

**Einsatz von *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus*-Stämmen zur Entwicklung und
Gestaltung technischer Vegetationssysteme
für die Gleisbett-Naturierung**

DISSERTATION

**zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum horticultrarum
(Dr. rer. hort.)**

eingereicht an der
**Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin**

von

Dipl. Gartenbau-Ingenieur Sadif Dunya
geboren am 03.08.1971 in Hatrieh, Syrien

Präsident
der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Dr. h. c. Jürgen Mlynek

Dekan
der Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
Prof. Dr. Dr. h. c. Uwe Jens Nagel

Gutachter:

1. PD Dr. Heiner Grüneberg
2. Prof. Dr. Dr. Christian Ulrichs
3. Dr. Hans-Joachim Henze

Tag der mündlichen Prüfung: 30.03.2005

-Meinen Eltern gewidmet-

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	1
2. Theoretische Grundlagen.....	5
2.1. Naturierung im Gleisbett.....	5
2.2. Extensivnaturierung.....	6
2.2.1. Nassansaat von Sprossen.....	8
2.2.2. Vegetationsmatten.....	9
2.3. Versuchsorganismen.....	10
2.3.1. Testpflanze <i>Sedum album</i>	10
2.3.2. <i>Bacillus subtilis</i>	12
2.3.2.1. Charakterisierung von <i>Bacillus subtilis</i>	12
2.3.2.2. Wirkungsmechanismen von <i>Bacillus subtilis</i>	14
2.3.3. <i>Lactobacillus</i>	28
2.3.3.1. Charakterisierung von <i>Lactobacillus</i>	28
2.3.3.2. Wirkungsmechanismen von <i>Lactobacillus</i>	29
3. Problem- und Zielstellungen.....	32
4. Versuchsmaterial und Untersuchungsmethoden, allgemeines.....	34
4.1. Versuchssubstrate.....	34
4.1.1. Bestimmung der Nährstoffgehalte der verwendeten Substratarten.....	34
4.1.2. Bestimmung der physikalischen Substratbeschaffenheiten.....	37
4.2. Naturierungsverfahren.....	38
4.3. Erfassung von Klimadaten.....	39
4.4. Allgemeine Vorgehensweise.....	39
4.4.1. Versuchsdurchführung.....	40
4.4.2. Bestimmung von Pflanzenwachstumsparametern.....	43
4.5. Statistische Auswertung.....	44
5. Untersuchungen zu Einzel- und Kombinationseffekten von Bakterien mit dem Nährsubstrat auf das Pflanzenwachstum (Freilandversuche).....	45
5.1. Versuchsserie 1 (Praxisversuch München).....	45
5.1.1. Material und Methoden.....	45
5.1.2. Ergebnisse und Diskussion.....	47

5.2.	Versuchsserie 2 (Komplexfeldversuch Berlin).....	50
5.2.1.	Untersuchungsmethodik Komplexfeldversuch Berlin.....	50
5.2.2.	Ergebnisse und Diskussion.....	54
5.2.3.	Nachweis der Wirksamkeit der inokulierten <i>Bacillus subtilis</i> - und <i>Lactobacillus</i> -Stämme auf das Pflanzenwachstum.....	72
5.2.3.1.	Gefäßtest mit Keimpflanzen.....	72
5.2.3.2.	Röhrchentest.....	76
5.3.	Versuchsserie 3 (Herbst / Winter).....	80
5.3.1.	Versuchsanlage.....	80
5.3.2.	Ergebnisse und Diskussion.....	82
5.3.3.	Nachweis der Wirksamkeit der inokulierten <i>Bacillus subtilis</i> - und <i>Lactobacillus</i> -Stämme auf das Pflanzenwachstum.....	90
6.	Untersuchungen in der Klimakammer.....	92
6.1.	Untersuchungsmethodik Klimakammerversuch.....	92
6.2.	Ergebnisse und Diskussion.....	95
6.3.	Nachweis der Wirksamkeit der eingesetzten <i>Bacillus subtilis</i> - Konzentrationen auf das Pflanzenwachstum.....	103
7.	Schlussfolgerungen und erste praktische Empfehlungen.....	106
8.	Vorschläge für weitere Forschungsarbeiten.....	111
9.	Zusammenfassung.....	112
	Literaturverzeichnis.....	118
	Verzeichnis der Abbildungen.....	137
	Verzeichnis der Tabellen.....	138
	Anhang.....	140

Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen

α	Signifikanzniveau
Abb.	Abbildung
Bd.	Band
cfu	"Colony forming units" (Anzahl koloniebildender Einheiten)
CMV	"Cucumber mosaic virus" (Gurkenmosaikvirus)
d	Tag
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau
FZB	Forschungszentrum für Biotechnologie
h	Stunde
IASP	Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte
ICE	Inter City Express
klx	Kilolux
PGPR	Plant Growth Promoting Rhizobacteria
U/min	Umdrehungen pro Minute
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Var.	Variante

1. Einleitung

Weltweit dehnen sich die Städte immer weiter aus, wobei gleichzeitig die Grünflächen Tag für Tag abnehmen. Diese Verstädterung setzt sich ununterbrochen fort. Folgen dieser Entwicklung sind unter anderem Umweltbelastungen wie Luftverschmutzung, Verkehrslärm, Temperaturerhöhung, Flächenversiegelung und Verbauung. Solche Veränderungen, die eine Verschlechterung des Stadtklimas und der Lebensqualitäten hervorrufen, haben allmählich zum Umdenken bei Planern und Architekten geführt. Um diesen entstandenen Bedürfnissen in den Städten nach Umweltschutz und Rückkehr zu mehr Naturraum in der Stadt gerecht zu werden, wird in den Großstädten Europas die Naturierung von Bauwerksoberflächen durchgeführt. Die Ausweitung an innerstädtischen Grünflächen erfolgt aus optischen und klimatischen Gründen möglichst auch dort, wo schon eine einfache Nutzung vorliegt. Dafür eignen sich die Flächen zwischen und neben den durch Schienen gebildeten Verkehrswegen für Schienenfahrzeuge (ORTWEIN 1991).

Das Gleisbett hat deshalb als stadtökologische Ressource ein zunehmendes Gewicht, um der anhaltenden Versiegelung und dem damit verbundenen Naturraumverlust entgegenzuwirken. Durch die vegetative Beschichtung der Oberflächen der Fahrwege und ihrer Begleitflächen bis an die Trennschicht an der Schiene bzw. dem Befestigungsmittel mit Hilfe eines hochporigen/dispersen und emissions-mindernden Naturierungssystems werden Eigenschaften eines Absorbers mit "Quasi-Entsiegelungseffekten" gefördert.

Dennoch bleiben Gleisbettungen genau so, wie andere urbane Vegetationsstandorte durch Stressfaktoren wie zum Beispiel Wassermangel, Nährstoffmangel und Trockenheit bzw. hohe Temperaturdifferenzen gekennzeichnet. Gleisbett-Naturierung ist eine vegetative Behandlung von Gleisbettbegleitflächen mit standortangepasster Vegetation (HENZE et al. 1996). Sie bringt viele Vorteile, die auf ökologischen, ökonomischen und gestalterischen Gebieten liegen:

1. Schaffung eines ästhetischen Erscheinungsbildes,
2. Verbesserung des Stadtklimas durch die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit,
3. Schaffung neuer, pflegearmer Lebensräume für Fauna und Flora,
4. Verminderung hoher Temperaturdifferenzen,
5. Ausgleich der innerstädtischen vegetativen Defizite,

6. die Schadstäube werden aus der Atemluft herausgefiltert,
7. Lärmimmission wird verringert,
8. Minderung der Sekundäremission von Schadstäuben,
9. Minderung des Eintrages von Schadstäuben in den Grundwasserleiter und in die Kanalisation.

Aus ökonomischer Sicht werden auch die Pflegekosten minimiert (keinerlei Wässerung, kein Schnitt, keine Entkrautung bzw. kein Einsatz von Herbiziden). Dennoch kann die Naturierung aus gestalterischen Gesichtspunkten vorteilhaft wirken, da die Grünflächen im Gleisbett nicht nur ökologischen und ökonomischen Belangen dienen, sondern auch ein notwendiger Bestandteil des Großgrüns eines faszinierenden Landschaftsbildes sind.

Darüber hinaus führten Forderungen von Öffentlichkeit und Stadtplanern nach einer stärkeren Berücksichtigung von ökologischen Aspekten bei der Gestaltung der Städte zu der Suche nach neuen Baustoffen bzw. innovativen Systementwicklungen zur Gleisbett-Naturierung. Diesbezüglich haben sich die Nassansaat von Sprossen auf einem darauf abgestimmten Pflanzensubstrat als kostengünstiges modernes Verfahren bei den Begrünungsverfahren im Gleisbett herausgestellt.

Im Gegensatz zu konventionellen Rasengleisen werden trockenheitstolerante, pflegearme, niedrigwüchsige und flachwurzelnde spezifische Pflanzengesellschaften eingesetzt, die den Extremstandort „Gleisbett“ erfolgreich besiedeln können. Ein wichtiges Kriterium bei der Artenwahl für die extensive Naturierung ist der geringe Bedarf an Substrat und die Fähigkeit der Pflanzen zur Wurzelmassebildung, damit dauerhaft geschlossene Bestände entstehen können. Ein derartiges Beispiel dafür können sukkulente Pflanzengesellschaften von verschiedenen *Sedum*-Arten und Sorten mit vollem Erfolg übernehmen. So kann die Farbenvielfalt der Pflanzen mit ihrem mattenbildenden Wachstum die Gestaltung wirkungsvoller Arrangements ermöglichen. Im Ergebnis sollten sich ganze Teppiche von weißen-, gelben-, rosafarbenen und roten Blüten sowie von anderen sich ergänzenden Blattfarben entwickeln können.

Aufbauend auf vorliegenden ersten Ergebnissen wurden Versuche in München und Berlin durchgeführt. Das Ziel der Untersuchung bestand darin, eine schnellere Bedeckung und bessere Durchwurzelung der Pflanzen durch den Einsatz von Rhizobakterienstämmen zu erreichen, um nach dem Einbau von Vegetationssystemen entstehende Erosionsschäden zu

verhindern und zugleich eine hohe Stresstoleranz der Pflanzen gegenüber Stressfaktoren zu erzielen. Das war der Ausgangspunkt der in Aussicht genommenen Dissertation.

Die selektierten *Bacillus subtilis*- Isolate besiedeln nach dem Angießen die Wurzeloberfläche, vermehren sich dort und wachsen mit den Wurzeln mit. Infolgedessen ist eine Stimulierung des Wurzelwachstums möglich. Die *Bacillus subtilis*- Stämme wurden aus natürlich vorkommenden Stämmen ausgewählt und nicht genetisch verändert (FZB 2002).

In letzter Zeit hat der Einfluss von *Bacillus subtilis* auf die Auswirkungen von Stressfaktoren großes Interesse gefunden. Auf extrem nährstoffarmen Standorten kann dadurch das Wachstum beschleunigt werden und gleichzeitig wird eine hohe Stresstoleranz gegenüber Trockenheit und Umweltbelastung erreicht (ECKFELDT 1997, JAHN 1998). Viele Versuche mit *Bacillus subtilis* haben die wachstumsstimulierenden Wirkungen bestätigt, die vermutlich auf die Produktion der pflanzenhormonähnlichen Stoffwechselprodukte des Bakteriums und die Erschließung von Mikro- und Makronährstoffen in pflanzenverfügbarer Form aus dem Boden (LOEFFLER et al. 1990, OBIEGLO 1992, GLÜCK 1993, KREBS et al. (1998), auxin-ähnliche Bioeffekte (ALYMA YEHU 1997, IDRIS 2002) und IAA- Präkursoren (DOLEJ 1998) zurückzuführen sind.

Zahlreiche Untersuchungen haben belegt, dass Behandlungen mit Rhizobakterien die Reaktionslage der Pflanzen gegenüber abiotischen Umweltfaktoren (LUNG 2000, BOCHOW et al. 2001, KONSTANTINOVA et al. 2002) und biotischen Schaderregern positiv beeinflussen und somit ihre Widerstandsfähigkeit und das Pflanzenwachstum verbessert werden können (SCHMIEDEKNECHT et al. 2001, MANJULA und PODILE 2001, CHAN et al. 2003, MURPHY et al. 2003).

Jedoch gibt es bisher keine Ergebnisse über den Einfluss von *Bacillus subtilis* auf das Wachstum von Pflanzen, die bei der Gleisbett-Naturierung eingesetzt werden. Außerdem wird die Naturierung im Gleisbett in der Patentrecherche bisher nur am Rande diskutiert. Dies stellt besonders unter den zunehmenden Umweltbelastungen einen wichtigen Untersuchungsschwerpunkt dar.

Aufgrund der besonderen Bedeutung von Trockenstress für die Verbreitung und Entwicklung der Sedumvegetation sollen in der vorliegenden Arbeit Auswirkungen der Applikation von *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf das Wachstum der Pflanzen unter den im Gleisbett genannten Stressoren untersucht und dargestellt werden. Vor dem Hintergrund einer

möglichen Beeinflussung der Stressresistenz der Sedumvegetation durch Behandlung mit den Bakterien interessieren insbesondere auch Kombinationseffekte mit einer Applikation von Nährsubstrat.

Deshalb soll die Schaffung eines Begrünungsverfahrens mit einer beschleunigten Vegetationsentwicklung bei hoher Stresstoleranz der Pflanzengesellschaften Ziel der Arbeit sein. So soll ein hydraulisches Nassansaat-Verfahren von Sedumsprossen geprüft werden. Zum Einsatz kommen zwei Nutzbakterien (*Bacillus subtilis* FZB 24 und *Lactobacillus*).

Im September des Jahres 2002 wurde ein Vorversuch in München angelegt, weitere Versuche wurden in Berlin 2003/04 durchgeführt. Es wurden auch in Berlin Freiland- und Laborversuche mit *Bacillus subtilis* realisiert. Die Ergebnisse bilden die Grundlagen für die Praxisversuche, die im Straßenbahngleis in Berlin angelegt werden sollen. Die Fläche für die Naturierung wurde in drei gleichgroße Blöcke geteilt; wobei jede Behandlungsvariante in dreimaliger Wiederholung angelegt worden war. Die Behandlungsvarianten umfassten die

1. Unbehandelte Vegetationskontrolle
2. Unbehandelte Vegetationskontrolle mit Nährsubstrat
3. Behandlungsvariante mit *Bacillus subtilis*-Stamm FZB 24
4. Behandlungsvariante mit *Lactobacillus*
5. Kombination von *Bacillus subtilis* mit Nährsubstrat
6. Kombination von *Lactobacillus* mit Nährsubstrat.

Nach Besiedlung der Sprossansaatens wurden verschiedene Parameter wie Bedeckungsgrad, Sprosslänge, Sprosshöhe, Sprossdurchmesser, Triebanzahl, Blütenanzahl und Anzahl der Pflanzenausfälle sowie die Wurzelanzahl und Wurzellänge bonitiert. Sowohl die Freiland- als auch die Klimakammerversuche wurden durch regelmäßige Substratanalysen begleitet.

Dieser Aufgabenstellung widmet sich die vorliegende Arbeit, bezogen auf die wachstumsstimulierenden und stressabbauenden Wirkungen von *Bacillus subtilis*-Stämmen sowie, die sich daraus resultierenden durch prächtige Blatt- und Blütenfärbung verschiedener *Sedum*-Arten verbesserte Gleisbettgestaltung.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Naturierung im Gleisbett

Naturierung: ist die vegetative Behandlung von vertikalen, horizontalen und geneigten technischen Bauwerksflächen, insbesondere mit standortangepasster Vegetation. Ziel ist die Schaffung einer integrierten vegetativen Multifunktionsschicht auf Dächern, Fassaden, Mauern, Gittern, Lärmschutzwänden, Gleisbettungen, ausgewählten Verkehrs- und Verkehrsbegleitflächen, Böschungen und Punktbauten (HENZE et al. 1996). Unter Gleisbett-Naturierung verstehen wir die vegetative Behandlung mit standortangepasster Vegetation (Ansiedlung von Pflanzengesellschaften) von Gleisbettbegleitflächen, speziell der Straßen- bzw. Stadtbahnen im Niedriggeschwindigkeitsbereich unter 80 km/h, die vom öffentlichen Fahrzeugverkehr abgetrennt sind.

Grüne Gleise haben in Deutschland eine lange Tradition. Im Unterschied zu Rasengleisen, die insbesondere wegen des Pflegeaufwandes nicht immer Akzeptanz fanden, konnte die seit 1995 entwickelte "pflegearme Gleisbettnaturierung" des IASP inzwischen in mehreren deutschen und europäischen Städten erfolgreich und kostengünstig umgesetzt werden.

Bei der Gestaltung im Gleisbett werden pflegearme, standortangepasste, flachwurzeln, niedrigwüchsige, xeromorphe sukkulente Pflanzenarten verwandt, die den extremen Anforderungen des Standortes mit einem hohen Bedeckungsgrad gewachsen sind und nach der Fertigungs- und Entwicklungspflege keinen weiteren Aufwand in Form von Bewässerung, Düngung und Schnitt benötigen (vgl. Tab. 1).

Ideal sind dafür Pflanzengesellschaften aus den Pflanzenfamilien der Dickblattgewächse (*Crassulaceae*) sowie Moose mit durchschnittlich <15 cm Wuchshöhe, die sich selbst überlassen werden können. Grundsätzlich muss die Gestaltung wesentlich das Bestreben der Menschen nach einem angenehmen Gefühl beim Abfahren mit der Straßenbahn helfen und gleichzeitig den Verkehr nicht behindern.

Es ist dennoch hervorzuheben, da sich das Gleisbett als Urbanstandort durch besonders ungünstige Standortbedingungen auszeichnet, wie z.B. Bodenverdichtung, Trockenheit, Wassermangel, Nährstoffmangel, hohe Salzgehalte, Abgase (PIETSCH & KAMIEHT 1991, JAHN 1998). Daher können Wachstum und Überlebensraten der Pflanzen auf diesem speziellen oft nährstoffarmen Standort begrenzt sein. Unter diesen klimatischen Bedingungen

können nur trockenheitstolerante und pflegearme spezifische Pflanzengesellschaften zufriedenstellend wachsen.

Tab. 1: Geeignete Pflanzen für die Gleisbett-Naturierungen (KRAMER et al. 1998)

Sukkulenten-/Moosgleis		Rasengleis
Sukkulenten	Moos	Gräser und Kräuter
<i>Sedum album</i>	<i>Barbula convoluta</i>	<i>Agrostis capillaris</i>
<i>Sedum sexangulare</i>	<i>Bryum argenteum</i>	<i>Cynosurus cristatus</i>
<i>Sedum acre</i>	<i>Bryum caespitium</i>	<i>Festuca ovina</i>
<i>Sedum reflexum</i>	<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Poa annua</i>
<i>Sedum spurium</i>	<i>Polytrichum piliferum</i>	<i>Papaver rhoeas</i>

Bei der Suche nach Lösungen, den zunehmenden Defiziten an Grünflächen in den Großstädten entgegen zu wirken, hat bereits die extensive Naturierung von Gleisbettungen an Bedeutung gewonnen.

Ein wichtiges Kriterium bei den extensiven Naturierungssystemen im Gleisbett ist der geringe Bedarf an Substrat und die Fähigkeit der Pflanzen zur Wurzelmassebildung, damit dauerhaft geschlossene Bestände entstehen können.

Rhizosphärenbakterien wie *Bacillus subtilis* bieten die Möglichkeit, eine Toleranzerhöhung der Pflanzen gegenüber Stressfaktoren zu erzeugen und das Pflanzenwachstum zu stimulieren. Das zeigt ihre besondere Bedeutung für das Wachstum und die Entwicklung, an Extremstandorten auch für das Überleben von Pflanzen. Diese Wirkungen wurden bisher unter erhöhten Stressbedingungen auf nährstoffarmen Freilandböden nicht genügend erforscht. Deshalb sind Untersuchungen auf urbanen, stressbelasteten Standorten wichtig.

2.2. Extensivbegrünung

Es wird heutzutage immer häufiger aus Gründen der Umweltpflege besonders in städtischen Bereichen eine Begrünung des Gleiskörpers verlangt. So ist hier insbesondere an eine extensive Begrünung zu denken, wenn von einem begrünbaren Belagmaterial gesprochen wird (GUMMIWERK 2001). Extensivbegrünungen sind naturnah angelegte Vegetationsformen mit dem Ziel, sich weitgehend selbst zu erhalten. Sie bestehen

überwiegend aus geschlossenen Beständen von Pflanzen mit geringer Wuchshöhe, wie z.B. Moosen, Sukkulenten, Kräutern und Gräsern. Die Vegetationsschicht ist nur dünn und darunter befindet sich eine kaum wirksame Drain- und Wasserspeicherschicht (OHLWEIN 1984, KRUPKA 1984, LIESECKE et al. 1989).

Die Höhe des Substrats auf den Schwellen beschränkt sich allerdings auf etwa 5 cm. Das Substrat muss durch seine Eigenschaften einen massigen, hohen Aufwuchs unterbinden. Es musste jedoch speziell auf die pflanzenphysiologischen und physikalischen Bedingungen abgestimmt werden (SCHADE 2000). Eine erfolgreiche Extensivbegrünung ist deshalb in besonderem Maße auf solche Pflanzen angewiesen, die trockenheitsresistent sowie anspruchslos sind und unter dieser Voraussetzung nur einer geringen Pflege bedürfen. Eine zusätzliche Bewässerungsanlage sowie besondere Maßnahmen zur Pflege und Wartung werden bei Extensivbegrünungen nicht vorgesehen (KOLB & SCHWARZ 1999).

Extensivbegrünungen können auch das vielfältige Erscheinungsbild naturnaher Begrünungen im Wechsel der Jahreszeiten darstellen. Höhepunkte sind Blütenaspekte, vornehmlich durch gelb, weiß und rot blühende *Sedum*-Arten und -Sorten im Frühsommer, wie auch durch halbhohes Gräser und Kräuter (LIESECKE et al. 1989).

Es gilt hier aus Gründen der Gestaltung bzw. Ästhetik für die Begrünung verschiedene *Sedum*-Arten, die mit einander rasenbildend wachsen, anzusiedeln, weil das vielfältig ist. Dabei spielen die verschiedenen Blüten- und Laubfärbungen eine wesentliche Rolle.

Die am meisten verwendete Art ist *Sedum album*, die mit ihren dunkelgrünen Blättern und weißen Blüten besonders begehrt ist. Sie entwickelt sich häufig mit *Sedum acre* und *Sedum sexangulare* in enger Vergesellschaftung.

Sedum acre erreicht das schnellste Flächenwachstum von allen *Sedum*-Arten. Seine hellgrünen Blätter werden unter Trockenstress graugrün. Die Art neigt im Gesamtbestand zur Massenblüte; die Blüte ist hellgelb. Die glänzend hellgrünblättrige *Sedum sexangulare* blüht zitronengelb und das Laub verfärbt sich unter Trockenstress braunbeige.

Weiterhin wurde ein gemeinsames Vorkommen von *Sedum reflexum* mit *Sedum album* und *Sedum spurium* in Trockenrasen festgestellt. Die kriechend wachsende blaugrüne *Sedum reflexum* blüht goldgelb und verfärbt sich unter Trockenstress graugrün.

Eine weitere wertvolle Art ist *Sedum spurium*, die sich als Bodendeckender mit dunkelgrünen Blättern auszeichnet. Die Stressfärbung des Laubes kann rötlich, aber auch olivgrün bis gelborange sein. Die Blüten können weiß, rosa, rot oder purpurfarben sein.

Bei den Pflanzen einer Sedumbegrünung handelt es sich um xeromorphe Pflanzen, die als besondere Standortanpassung Wasserspeicherzellen ausgebildet haben, da sie von Natur aus an Standorten wachsen, deren Boden nur geringe Wassermengen speichern kann und weil dieser sehr dünnschichtig ist. Besonders im Sinne einer effizienten Trockenanpassung kann auch die Ausbildung der Crassulaceen-Säurestoffwechsel (CAM), mit einer vorwiegend nächtlichen CO₂-Aufnahme bei tagsüber weitgehend ruhendem Gaswechsel, angesehen werden (MAUSETH 2000, STRASBURGER et al. 2002).

Die bei dieser Begrünung verwendeten Pflanzen sind überwiegend Oberflächenwurzler und können sich nur bei einem begrenzenden Wasserhaushalt gegenüber konkurrierenden Pflanzen durchsetzen. Die Sedumbegrünung bedarf keiner Pflege, insbesondere brauchen die Pflanzen nicht gemäht zu werden. Die Pflanzen sind außerdem so niedrig, dass der Schienenverkehrsweg stets als solcher zu erkennen ist (ORTWEIN 1991). Bei der Begrünung einer Gleistrasse kommen zwei Verfahren in Betracht:

2.2.1. Nassansaat von Sprossen

Bei dieser Begrünung wird die Vegetationsschicht nach BREUNING (1996) als so genannte Anspritzbegrünung oder Nassaussaat unter Verwendung eines flüssigen Klebemittels aufgebracht, wobei die Anwendung so erfolgt, dass das Klebemittel bis in eine gewisse Tiefe in die Vegetationstragschicht eindringt, so dass die Vegetationstragschicht verankert wird und die Begrünung dadurch hohen Windsoglasten problemlos standhält.

Solche Anspritzverfahren eignen sich für die Begrünung größerer Flächen von *Sedum*-Arten zur Extensivbegrünung und bieten mehrere Vorteile gegenüber den Trockenansaat. Da das Saatgut und der Kleber in einem Arbeitsgang aufgebracht werden, wird das Risiko von Saatgutverwehungen und von Wind- und Wassererosionen erheblich gemindert. Zudem ist in der Regel durch die Anwendung von Anspritzverfahren ein guter Bodenkontakt gewährleistet (LIESECKE et al. 1989).

Zum Einsatz kommen verlängerte Druckschläuche oder Sprühpistolen. Individuelle Verfahrensmodifizierungen sind jedoch auch unter Verwendung kleiner Förderpumpen und Mischbehälter im direkten Einsatz bereits mit Erfolg erprobt worden.

In Abhängigkeit von den eingesetzten Pumpen und Schlauchdüsen kann das Anspritzen von Sedumsprossen Schwierigkeiten bereiten. Die Sprosse können durch die Förderpumpe zu

stark beschädigt werden oder die Düse verstopfen. In diesem Fall empfiehlt es sich, die Sprosse vor dem Anspritzen mit der Hand auszustreuen.

Das Ausstreuen von Sprossteilen bietet die Möglichkeit, die trockenheitsverträglichen *Sedum*-Arten flächendeckend und rationell anzusiedeln (KRUPKA 1983, LIESECKE 1984, 1985). Dazu werden Triebstücke verschiedener *Sedum*-Arten und Sorten in ca. 1-4 cm Länge durch flächiges Abschneiden im Anzuchtbetrieb gewonnen. Die am häufigsten verwendete Art ist *Sedum album*. Für die Sprossteile von *Sedum*-Arten gelten die Anforderungen der Gütebestimmungen für Stauden (FLL 1995). Als Ausbringungszeitpunkt sind das zeitige Frühjahr und der Spätsommer bis zum Frühherbst am günstigsten.

2.2.2. Vegetationsmatten

Vegetationsmatten sind vorgefertigte Pflanzenbestände. Sie werden im Regelfall für die Extensivbegrünung auf einer Trägersubstanz aus Kunststoffen, Recycling-Materialien oder organischen Reststoffen vorkultiviert, um dann auf einer Vegetationstragschicht wie Rollrasen verlegt zu werden (KOLB u. SCHWARZ 1999). Sie lassen sich bei Bedarf wieder ausbauen oder bei Beschädigung zum Beispiel durch Verkehrsunfälle leicht ersetzen. Eine ausreichende Dränung des Untergrundes der Begrünung reduziert die Ansiedlung von Fremdbewuchs auf ein Minimum. Die Wasserspeicherung ist für die Sedumpflanzengesellschaft ausreichend.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der raschen Bestandsbildung und damit verbundenen geringen Erosionsgefahr. Für die Gleisbettbegrünung stellt diese beschriebene Bauweise mit Vegetationsmatten eine günstige Möglichkeit dar (SCHADE 2000):

1. Sie lässt sich schnell und weitgehend ohne Fertigstellungspflege herstellen.
2. Der Aufwand in der Folgezeit bleibt ebenso gering, da keine Mäharbeiten anfallen.
3. Eine Beeinträchtigung des Schienenverkehrs tritt nicht auf, da die Pflanzen nur eine geringe Wuchshöhe haben.

Für alle Pflanz- und Saatmaterialien existieren Richtlinien für die Qualität. So sind Stauden, Kleinballenpflanzen und Sprossen nach den „Gütebestimmungen für Stauden“ (FLL 1994) sowie „Regelsaatgutmischung für Rasengräser“ (FLL 1997, jährliche Neuauflage) zu liefern, wenn keine anderen Vereinbarungen getroffen werden.

2.3. Versuchsorganismen

2.3.1. Testpflanze *Sedum album*

Systematik von *Sedum album* L.

Sedum album L., gehört zu der Familie *Crassulaceae*, Gattung *Sedum*, welche in die Ordnung der *Rosales* einzuordnen ist. Die *Rosales* sind Teil der Unterklasse *Rosidae*, die wiederum zur Klasse der *Dicotyledonae* zu rechnen sind (SENDL 1992).

Verbreitung

Unter dem Namen Fetthenne oder Mauerpfeffer bekannt, ist *Sedum* die umfangreichste Gattung der Familie *Crassulaceae*. Sie hat ihr Verbreitungsgebiet vorwiegend auf der nördlichen Halbkugel im Mittelmeerraum, auf dem eurasischen Festland, in China, Japan und ist in Mexiko heimisch. Einige Arten stammen aus Zentralafrika, Madagaskar und Südamerika (RAUH 1979, MÜLLER 1982).

Weiterhin gehören mitteleuropäische Arten aus der Gattung *Sedum*, die bevorzugt an sandigen und felsigen Standorten mit geringem Wasserhaltevermögen vorkommen, in dieses Klimagebiet. *Sedum*-Arten besiedeln hauptsächlich die mitteleuropäischen Hochgebirge, wo sie von der alpinen bis in die nivale Stufe vorkommen können (SCHUBER 1983).

Kaum eine Gattung der Dickblattgewächse ist so weltweit verbreitet wie *Sedum*. Die nahezu 500 verschiedenen Arten gedeihen überwiegend dort, wo Hitze und Dürre, Kälte und Schnee zu Hause sind. Der Großteil der vielgestaltigen Arten, Formen, Varietäten und Hybriden ist in unserem Klima winterhart und stellt somit eine wertvolle Bereicherung für unsere Gärten dar. Vornehmlich sind es die europäischen und asiatischen Arten, die schon vor langer Zeit Einzug in viele Steingärten hielten. In den letzten Jahren kamen einige neue Arten aus den USA hinzu. Damit ist das Freilandsortiment noch größer und die Einsatzmöglichkeiten dieser Pflanzen noch vielseitiger geworden.

Unterarten, Varietäten und Gartenformen haben den Typ vom *Sedum album* in der gärtnerischen Kulturen nahezu verdrängt. Zum Beispiel die rotlaubige Sorte "Coral Carpet", die sich mit ihrem starken Flächenzuwachs auf Dächern bewährt. Die Sorte "Chlorticum", die bei Trockenheit die schöne hellgrüne Farbe hat. Ebenfalls die Unterart "Micranthum", die je nach Standortbedingungen ganzjährig eine rotbraune Blattfarbe zeigt. Gestalterisch sind reiche und farbenprächtige Blüher besonders begehrt. Gerade an vollsonnigen Standorten

nimmt das Blühen zwischen Mai und Oktober kein Ende. Ganze Teppiche von weißen, gelben, rosafarbenen und roten Blüten schmücken die *Sedum*-Fläche.

Bedeutung

Schon seit langer Zeit haben Sukkulente, nicht zuletzt wegen ihrer oft auffallenden Wuchsform, das Interesse der Wissenschaft geweckt. Doch auch die häufig extremen Standortbedingungen, sowie die daher notwendigen Anpassungen lieferten zusätzliche Impulse für die Beschäftigung mit Sukkulente (HELBSING 1987).

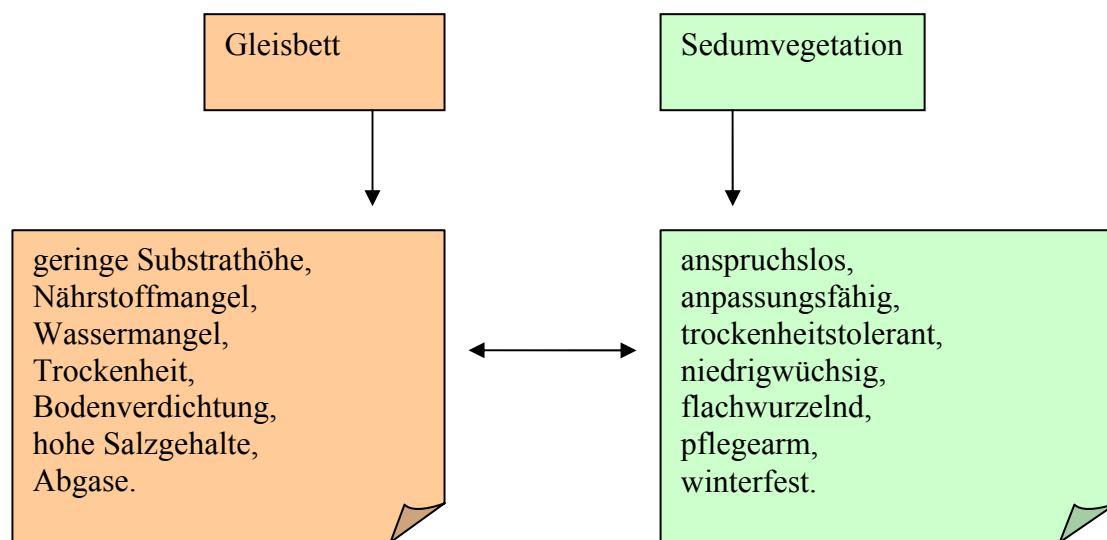


Abb. 1: Wechselbeziehungen zwischen der Sedumvegetation und dem Gleisbett.

Sowohl die Anlage von Wasserspeichergeweben zur Überdauerung ausgedehnter Trockenperioden, als auch die drastische Reduzierung der besonders unter ungünstigen Klimabedingungen auftretenden Wasserverluste weisen Sukkulente als so genannte "drought avoider" und "water saver" aus (LEVITT 1980). Die Speicherung von Wasservorräten, welche während der oftmals nur kurzfristigen Niederschlagsperioden angelegt werden, kann im Wurzel-, Blatt- oder Sprossbereich erfolgen; sie bewirkt ein ständig hohes Wasserpotenzial der Pflanzen und damit eine deutliche Zunahme der Trockenanpassung. Vor allem stellt daneben die Verringerung der stomatären Transpiration eine bedeutende Adaption an die Klimaverhältnisse urbaner Standorte dar, welche bevorzugt von Vertretern der *Crassulaceae* besiedelt werden (TEERI et al. 1978).

So kommt noch die Gefrieravoidanz mit Hilfe der Unterkühlung bei der Sedumvegetation unter Einwirkung niedriger Temperaturen, ein für die Frostresistenz bestimmender Faktor hinzu. Frostabhärtung beruht stets auf Avoidanz- und Toleranzmechanismen, welche durch beträchtliche starre Wuchsformen und hydrophobe kutikuläre Beschichtung begünstigt wird. Darüber hinaus wird der Gefrierschutz durch wachstumshemmende Einflüsse wie z.B. abnehmender Wassergehalt, geringe Zellgrößen, niedriges osmotisches Potential und ansteigende Zellsaftkonzentrationen induziert (LARCHER 1985).

Sedum-Arten eignen sich wegen ihres rasenbildenden Wuchses äußerst gut für die dauerhafte extensive Begrünung von Gleisbettungen und Dächern, also schwierigen Gartenplätzen (vgl. Abb. 1). Hierzu gehört auch das Befestigen steiler Hänge mit einigen wüchsigen Arten. Damit lassen sich auch steilste Hänge begrünen. Die Pflanzen stellen an die Pflanzeerde keine besonderen Ansprüche (KLEINER 1985). Eine bekannte und schönblühende, gleichmäßig rasenbildende Art ist *Sedum album*. Sie wächst locker mit weißen Blüten und dunkelgrünen Blättern, die besonders unter Trockenstress rötlich werden (KRUPKA 1992).

2.3.2. *Bacillus subtilis*

2.3.2.1. Charakterisierung von *Bacillus subtilis*

Bacillus subtilis wird der Abteilung *Bacteria*, Klasse *Schizomycetes*, Ordnung *Eubacteriales*, Familie *Bacillaceae*, Gattung *Bacillus* zugeordnet (MÜLLER 1965, JACOB et al. 1981).

Zunächst wurde *Bacillus subtilis* von EHRENBERG (1835) und einige Jahre danach von COHN (1872) beschrieben. Das Bakterium ist bewegungsfähig, peritrich begeißelt, aerob und besitzt eine stäbchenförmige Gestalt (SCHLEGEL 1992). Die Stäbchen besitzen eine Breite von 0,7-0,8 µm und eine Länge von 2-3 µm (HALLMANN und BURKHARDT 1974, PARRY et al. 1986).

Auf Nährmedium bildet *B. subtilis* weiße, gefaltete oder glatte Kolonien und sporuliert am besten auf Boden-Extrakt-Agar nach 3d bei 28 °C. Zur Sporulation und Antibiotikabildung sind aerobe Bedingungen notwendig (LOEFFLER et al. 1990).

Bacillus subtilis ist ein grampositives Bakterium, dessen natürliches Habitat der Boden ist. Es gibt sowohl saprophytisch lebende wie auch pathogene *B. subtilis*-Isolate (MÜLLER 1980, AHMED 1999). Im Boden ist *B. subtilis* verschiedensten, häufig wachstumshemmenden

Einflüssen wie zum Beispiel Hitze, Kälte und Trockenheit ausgesetzt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich *B. subtilis* im Boden den größten Teil der Zeit in einem nicht wachsenden Zustand befindet (KNOTT et al. 1995).

Besonders bekannt ist *B. subtilis* durch die intensive Untersuchung der Sporulation, da sie ein einfaches Modell der Zelldifferenzierung darstellt. Die Sporen sind widerstandsfähig gegen Hitze und Trockenheit (SINGLAIR 1989, FRITSCHKE 1990, HENTSCHEL 1997), chemische Mittel und andere letale Einflussfaktoren wie z.B. die UV-Strahlung (BYLISS et al. 1981, SCHRÖDER 1991, SCHLEGEL 1992). Diese Fähigkeit zu Bildung solcher Endosporen stellt sicher eine der speziellen Adaptionsstrategien an das Leben im Boden dar, und kann zugleich eine lange Haltbarkeit unter unkomplizierten Lagerbedingungen gewährleisten (ROSSALL & MCKNICHT 1991, ROSENKRANZ 1996, KRISP 2002).

Die resistenten Sporen können durch eine Hitzebehandlung mit subletalen Temperaturen, extremen pH-Werten und reduzierenden Agenzien (FOSTER & JHONSTONE 1989) sowie Wurzelexsudaten im Rhizosphärenbereich (GANTSCHIEVA 1993) aktiviert werden. Dank der leichten Sporenbildung und der komplexen phytosanitären Wirkungen lässt sich *Bacillus subtilis* einfach kultivieren (BOCHOW 1990, TURNER & BACKMAN 1991).

Der pH-Wert für das Bakterium wird zwischen 4,5 und 8,6 angegeben. Das Optimum liegt bei pH 6-7,5 (THIMANN 1964). Die Untersuchungen von BROADBENT et al. (1971) wiesen nach, dass bei niedrigem pH-Wert die erwartete Wachstumsförderung und höhere Wirkung von *B. subtilis* ausblieben. Sie begründeten das damit, dass der niedrige pH-Wert Phosphor im Boden bindet und unbrauchbar für die Pflanze und den Antagonisten macht. Außerdem ermittelten REDDY und RAHE (1989) eine höhere Populationsdichte von *B. subtilis* in der Rhizosphäre von Zwiebelkeimlingen bei einem pH-Wert von 6,5 in Vergleich zu einem geringeren pH-Wert von 4,5.

Das aktive Bakterium verträgt einen Temperaturbereich von 5 bis 55 °C (SINGLAIR 1989), wobei das Optimum bei 25 °C liegt (GUPTA & UTKEHDE 1986). Die Aktivitäten von *B. subtilis* in Bezug auf die Vermehrung und Ausscheidung von Antibiotika und anderen Stoffwechselprodukten und damit auf die phytosanitäre Wirkung sind insgesamt von der Temperatur beeinflusst (JAMAL 1993).

Die große Bedeutung der Temperatur zeigt sich auch bei praktischen Einsatzversuchen in

einem verringerten Wachstum der Antagonisten bei niedrigen Temperaturen im Vergleich zu höheren sowie einer damit verbundenen Verminderung der Produktion antibiotisch wirkender Substanzen (SCHMIEDEKNECHT 1990). Weiterhin ist das Bakterium auch mindestens zwei Jahre (ungekühlt) lagerstabil (JUNGE et al. 2001).

Hervorzuheben ist auch bei *B. subtilis* seine problemlose Mischbarkeit mit allen Düngern und den meisten Pflanzenschutzmitteln, die zur Stabilisierung bzw. Erhöhung seiner Wirksamkeit führen kann (FZB 2002). Einen synergistischen Effekt durch Kombination von *B. subtilis* mit dem Fungizid Anchor[®] (Carbathiin + Thiram) gegen *Rhizoctonia solani* an Erbsen erreichten HWANG & CHAKRAVARTY (1992). Von viel versprechenden Ergebnissen durch gemeinsame Applikation von *B. subtilis* mit Zineb berichteten OBIEGLO et al. (1990).

Weitere Wirkungen durch Kombination des Nutzbakteriums mit den fungiziden Wirkstoffen Captan, Vinclozolin, Iprodion, Metiram und Prochloraz in stark reduzierten Aufwandmengen beobachtete JAMAL (1993). Voraussetzung für den Erfolg solcher Kombinationen ist in diesem Fall die Verträglichkeit des Nutzbakteriums mit der eingesetzten Wirkstoffkonzentration des Pflanzenschutzmittels (ZIMMER 2003).

HOSOI et al. (1999, 2000) wiesen auf eine Beziehung hin zwischen *Bacillus subtilis*, dessen potentiellen Nutzen als Probiotic und *Lactobacillus*. So konnten Wachstum und Überlebensfähigkeit von *Lactobacillus reuteri* und *Lactobacillus acidophilus* in Anwesenheit von *Bacillus subtilis* (*Natto*) *in vitro* gefördert werden. Auslöser dieser Wachstumsförderung war möglicherweise die Bildung von Substanzen wie Subtilisin, Catalase durch *B. subtilis* (*Natto*).

2.3.2.2. Wirkungsmechanismen von *Bacillus subtilis*

Die Nutzung der multivalenten Vertreter von *B. subtilis* in der Rhizosphäre besteht einmal in der Erhöhung der Verfügbarkeit von Nährstoffen für die Pflanzen und zum anderen in der Unterdrückung von parasitären und nichtparasitären Pathogenen (SCHIPPERS et al. 1987). Die Aktivität dieser Bakterien steht mit ihren Fähigkeiten zum Kolonisieren, Überleben und zur Produktion aktiver Metabolite während des Wachstums der Pflanzenwurzeln in Verbindung (ALSTRÖM 1987).

Bacillus subtilis besiedelt nach Anwendung als Beizmittel oder nach Angießen die Wurzeloberfläche, vermehrt sich dort und wächst mit den neuen Wurzeln mit. Die Art und Weise,

wie *B. subtilis* das Pflanzenwachstum positiv beeinflussen kann, ist kompliziert und umfasst unterschiedliche Wirkmechanismen (KILIAN et al. 2000). Für eine direkte Wirkung von *B. subtilis* werden verschiedene Mechanismen angenommen (siehe Abb. 2).

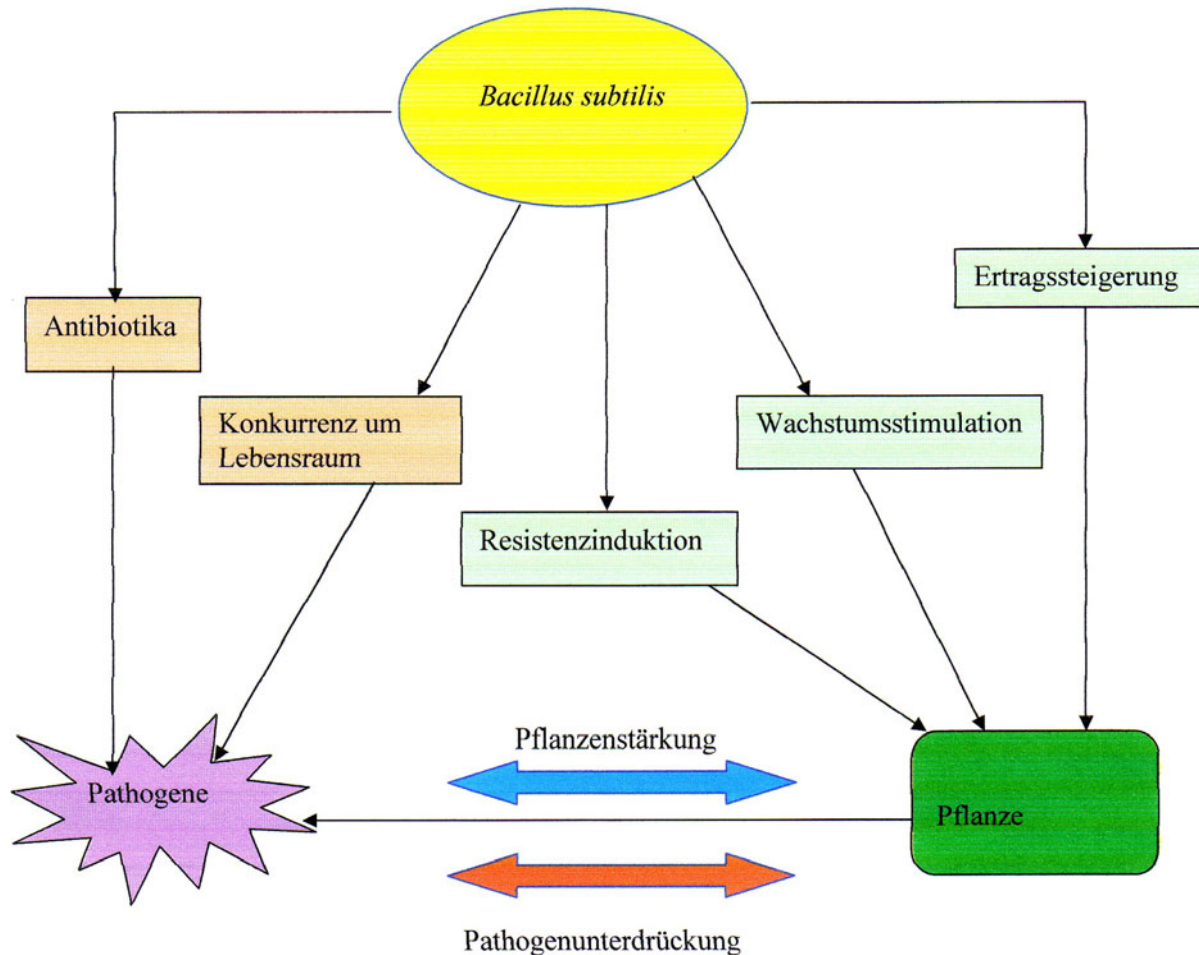


Abb. 2: Wirkmechanismen von *Bacillus subtilis* (KILIAN et al. 2000).

Wachstumsstimulierende Mechanismen

Praktische Erfahrungen zeigen, dass *B. subtilis*-Stämme eine beträchtliche Auswirkung auf Pflanzenwachstum, -entwicklung und -produktivität haben. Diese Leistungsfähigkeit, das Wachstum und den Ertrag zu fördern, ist stets mit der phytosanitären Wirksamkeit der Bakterien verbunden (STEINER 1990, KREBS et al. 1998, GROSCHE et al. 1999).

Bereits konnten nach der Applikation von *B. subtilis* in den Rhizosphärenbereichen

verschiedenster Pflanzengattungen wie Mais (*Zea mays*) (FEY 1996), Winterweizen (*Triticum vulgare*) (ZASPEL 1992), Sonnenblumen (*Helianthus annuus*) (SCHMIEDEKNECHT 1996), Baumwolle (*Gossypium* sp.) (BRANNEN & BACKMAN 1994), Cyclamen (JACOB 1992) und Erbse (*Pisum sativum*) (GANTCHEVA 1993) wachstumsfördernde Effekte beschrieben werden.

ZHANG et al. (1995) stellten nach einer Saatgutbehandlung von Rapssamen (*Brassica napus*) mit *B. subtilis* eine signifikante Erhöhung der Wurzellängen und der Blütenanzahlen fest. Bekannt sind ferner bei vielen Kulturpflanzen, besonders im Jugendstadium, wachstumsfördernde Wirkungen nach Behandlung mit *B. subtilis* (BOCHOW 1992).

Auch im Zierpflanzenbau führten *B. subtilis*-Anwendungen zu Ertragssteigerung und zur Qualitätserhöhung, z. B. in der Schnittcyclamenproduktion (JACOB 1992), bei der Bewurzelung von Edelnelkenstecklingen (*Dianthus annuus*) (OBIEGLO 1992, JACOB et al. 1992), *Pelargonium zonale*-Stecklingen (JACOB & HAMDAN 1992) und Ziergehölzstecklingen (JACOB et al. 1991, GLÜCK 1993).

BROADBENT et al. (1977) stellten bei einer breiten Palette von Zierpflanzensamen (*Portulaca* sp., *Delphinium* sp., *Celosia* sp. u.a.) höhere Auflaufraten sowie ein verbessertes Sämlingswachstum fest. REDDY und RAHE (1989) erzielten eine erhöhte Wurzel- und Sprossstrockenmasse bei Zwiebelpflanzen durch eine Saatgutbehandlung mit *Bacillus subtilis*. Weiterhin dokumentierten (DOLEJ 1998, KREBS et al. 1998, MARTEN et al. 2000) positive Effekte bei der Wachstumsförderung der Pflanzen durch das Kolonisieren von *Bacillus* und *Paenibacillus*-Stämmen im Wurzelbereich.

Trotz des Befalles mit Pathogenen sprachen MANJULA und PODILE (2001) über ein verbessertes Wachstum und Biomassenentwicklung der Sämlinge von Erdnuss (*Arachis hypogaea*) und Erbse (*Pisum sativum*) nach der Behandlung mit *Bacillus subtilis* AF 1-Formulate. Dabei konnte induzierte Resistenz gegen *Fusarium udum* bei Erbse und *Aspergillus niger* bei Erdnuss festgestellt werden.

In den Jahren 2000 und 2001 wurden in der Türkei Versuche durchgeführt, um die Wirkung von Blattapplikation des *B. subtilis*-Stammes OSU-142 auf den Ertrag, das Wachstum und die Ausprägung der Schrotschusskrankheit bei Aprikosen (*Prunus armeniaca*) zu untersuchen. Aprikosen der Sorte „Hacihaliloglu“ wurden während der Vollblüte und 30 bzw. 60 Tage danach besprüht. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede hinsichtlich Ertrag, Triebentwicklung, und Reduktion der Schrotschuss-Symptome. Der durchschnittliche

Ertragzuwachs lag bei 30 bzw. 90 % gegenüber der Kontrolle. Die verminderte Häufigkeit und Schwere der Krankheitsausprägung betrug 52 bzw. 71 % im Jahr 2000, 15 bzw. 41 % in 2001. Auch die Werte für Durchmesser und Länge der Triebe waren bei mit OSU-142 behandelten Bäumen signifikant höher. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten einen deutlichen Zuwachs hinsichtlich Qualität und Quantität der erzeugten Aprikosen durch die Anwendung von OSU-142 zum Zeitpunkt der Vollblüte (ESITKEN et al. 2002).

In den USA stellten MURPHY et al. (2003) durch Kombinationseffekte von GB03 (*Bacillus subtilis*) mit einem der PGPR-Stämme: SE 34 (*B. pumilus*), IN 937a (*B. amyloliquefaciens*), IN937b (*B. subtilis*), INR7 (*B. pumilus*), oder T4 (*B. pumilus*) auf das Wachstum der Tomatenpflanzen (CMV-inokuliert) signifikante Wachstumsförderung fest bezüglich von Pflanzenhöhe, Frischgewicht sowie Anzahl der Blüten und Früchte im Vergleich zur Kontrolle, die nur mit Gurkenmosaik-Virus infiziert war. Anschließend wurde eine induzierte Resistenz gegen CMV erzielt.

Das Bakterium hatte einen nachweisbaren Einfluss auf die Adventivwurzelbildung. Sowohl *B. subtilis* als auch Wachstumsstoffe förderten in Baumschulversuchen die Bewurzelungsqualität der Prunusstecklinge (Wurzelfrischmasse, Wurzelanzahl) und zugleich war bei einigen Gehölzen mit besonders empfindlichem Laub in der Stecklingsvermehrung (*Hamamelis*, *Tilia*) eine verbesserte Haltefähigkeit der Blätter am Steckling zu beobachten (PLIETZSCH et al. 1994). Des weiteren wurden auch positive Effekte einer allein- und kombinierten Inokulation von *Bacillus polymyxa*-Isolaten L6-16R, Pw-2R, und S20-R mit Mykorrhizapilzen (*Wilcoxina* sp.) bei Koniferen-Stecklingen (*Pinus contorta*) erzielt (SHISHIDO et al. 1996). Alle 3 *Bacillus*-Stämme förderten das Pflanzenwachstum signifikant. Die Wachstumsstimulation war bis über 18 % bezüglich Wurzelfrischmasse gegenüber der unbehandelten Kontrolle zu verzeichnen.

Zudem wurde *Bacillus subtilis* in Forstbaumschulen zur Verbesserung der Vitalität und Vegetationsleistung bei Eichensämlingen (*Quercus petraea*) eingesetzt. Wurzelhalsdurchmesser und Trieb länge der behandelten Pflanzen lagen geringfügig über denen der unbehandelten. Die Gesamtpflanzenmasse der behandelten Pflanzen war im Durchschnitt der Masse der unbehandelten weit überlegen (LEHMANN 2000)

Positive Effekte durch *B. subtilis*-Einsatz im Rasen liegen vor (LUNG 2000). Bereits in einem Großflächenversuch 1998 auf dem Golfplatz Niederreutin konnten nur kurze Zeit nach der Aussaat infolge einer Behandlung mit *B. subtilis* erste Unterschiede festgestellt werden. Dabei lag der Deckungsgrad der behandelten Parzellen nach sechs Wochen bei 100 %. Die

Kontrolle schwankte von 50 bis 70 %. Ein Jahr nach der Aussaat war auch die Durchwurzelungstiefe in den behandelten Flächen bis zu 30 % besser.

Ein weiterer Praxisversuch wurde im Jahr 1999 an der ICE-Trasse Frankfurt-Köln in Form einer Böschungsbegrünung mit Rasen im Nassanspritzverfahren durchgeführt. Währenddessen wurde unter ungünstigen Bedingungen, wie fehlender künstlicher Beregnung im Vergleich zur Kontrolle, eine schnellere Bestandsentwicklung in den behandelten Flächen, bedingt durch eine schnellere Keimung und wahrscheinlich durch eine erhöhte Trockenresistenz wahrgenommen.

Unter Pathogenabwesenheit beobachtete KOCH (2001) das Ereignis der Wachstumsstimulation in Begleitung mit der wachstumsinhibierenden Wirkung mancher Rhizobakterien und *Trichoderma* spp. bei der Erbse (*Pisum sativum*), Gurken (*Cucumis sativus*) und Brokkoli (*Brassica* sp.).

In vitro fanden SCHMIEDEKNECHT et al. (2001), dass die antagonistische Wirkung von *B. subtilis* gegen pflanzenpathogene Pilze wie *Fusarium oxysporum* bei Mais und *Seclerotinia sclerotiorum* bei Sonnenblumen je nach Kulturbedingung variiert, z. B. hinsichtlich der Zusammensetzung, Temperatur und pH-Wert. Zuwenig Eisen-Verfügbarkeit im Nährmedium führte zu einer gesteigerten Konkurrenz zwischen Mikroorganismen und brachte gleichzeitig mehr Aktivität gegen Pilze, während sich Wachstums- und Sporulationrate von *B. subtilis* bei Anwesenheit vom Stickstoff veränderten. Besser war es aber, wenn das Bakterium im Landymedium mit Nitrat-Stickstoff inkubiert wurde als in der Ammonium-Stickstoff Brühe. In dieser Studie wurde angenommen, dass *B. subtilis* Substanzen produziert, die für mehr Ertrag und besseres Wachstum von Mais und Sonnenblumen verantwortlich sind. Jedoch blieb die Aktivitätsleistung und die Befallsreduktion bei Mais und Sonnenblumen *in vitro* nicht stets mit denen im Gewächshaus und in Feldversuchen verbunden. Hinnehmbar ist aber nur der Fall der Bekämpfung von *Seclerotinia sclerotiorum* bei Sonnenblumen in Feldversuchen.

BAI et al. (2002) konnten wachstumsfördernde Rhizobakterien außer den endosymbiosen *Bradyrhizobium*-Stämmen aus pflanzlichen Wurzelgeweben (oberflächensteril) von Soyabohnen (*Glycine max* (L) MerT.) isolieren. Die Isolate wurden als *nicht-Bradyrhizobium* endophytische Bakterien NEB benannt und waren als NEB4, NEB5 und NEB17 bezeichnet worden. Es wurde herausgefunden, dass die Applikation von NEB zur Gewichtssteigerung

von Soyabohnen unter stickstofffreien Bedingungen führte, wenn die Pflanzen mit einem der genannten Stämme und *Bradyrhizobium japonicum* inokuliert waren gegenüber der Behandlung mit *B. japonicum* allein. Die Behandlungen mit den NEB ohne *Bradyrhizobium japonicum* zeigten jedoch keine Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum. Durch Nachweisverfahren wurde festgestellt, dass die Stämme zum Genotyp *Bacillus* gehörten, aber Ergebnisse einer phylogenetischen Analyse belegten, dass die Stämme NEB4, NEB5 *B. subtilis*- Isolate waren, während der NEB17-Stamm dem *B. thuringiensis* angehörte.

Als Ursache für die Wachstumsförderung nach der *B. subtilis*-Applikation wird angenommen, dass *B. subtilis* Phytohormone bzw. deren Präkursoren, Phytohormonderivate und andere aktive Substanzen: Stoffwechselprodukte wie Proteine und Proteinkomplexe, die bei der Pflanze eine hormonähnliche Wirkung verursachen, bilden (FRANKENBERGER & ARSHAD 1995, DOLEJ 1998, BOCHOW und DOLEJ 1999).

Darüber hinaus zeigten *Bacillus subtilis*-Behandlungen bei Stecklingen von Nelken und Ziergehölzen wie *Prunus tomentosa* und *Prunus kurilensis* (GLÜCK 1993) eindeutige Effekte bei der Bewurzelungsverbesserung, die Phytohormon-Behandlungen gleichzusetzen sind (OBIEGLO 1992).

In Kulturen von *B. subtilis* wurden gibberellin-ähnliche Substanzen (KATZNELSON u. COLE 1965), Gibberelline (BROADBENT et al. 1977) Zeatin, Absizine und Giberelline (TANG 1994) und Cytokinine (STEINER 1990, ZASPEL 1992), auxin-ähnliche Bioeffekte (IDRIS 2002, ALYMAYEHU 1997) und IAA- Präkursoren (DOLEJ 1998, SEMBDNER et al. 1998, STEENHOUDT und VANDERLYDEN 2000) im Nährmedium gefunden, die vermutlich für die Stimulierung des Pflanzenwachstums verantwortlich sind. Es wurden auch Spuren von Ethylen in den Wurzelzellen angenommen (LI et al. 2000).

Es kann festgestellt werden, dass die Stimulation des Wachstums von Pflanzen durch die pflanzenwachstumsfördernden Rhizosphärenbakterien "PGPR" auf die Produktion von pflanzenhormonähnlichen Metaboliten und die Erschließung von Nährstoffen (Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, B-Vitamine und Aminosäuren) unter Mitwirkung von diazotrophischen und phosphatmobil-Bakterien in pflanzenverfügbarer Form aus dem Boden zurückzuführen ist (ROZYCKI et al. 1999, NAUTILYAL et al. 2000).

RYU et al. (2003) demonstrierten, dass manche Mikroorganismen "PGPR" das Wachstum von *Arabidopsis thaliana* stimulieren können mit dem Hinweis, dass die Bakterien verschiedene nichtverfügbare organische Komponenten wie 2,3-Butanediol und Acetoin

produzieren. Anschließend wurde der wachstumsfördernde Einfluss der Applikation von 2,3-Butanediol bestätigt.

Dank der aktiven Besiedlung der Pflanzenwurzeln mit Mikroorganismen könnten solche Substanzen direkt von der Pflanze aufgenommen werden und somit auch das natürliche Bodenleben und das Pflanzenwachstum verbessern (KLOEPPER et al. 1989, 1991, FROMMEL et al. 1993, FZB Biotechnik GmbH 2002).

Eine ähnliche Hypothese besagt, dass einige *Bacillus subtilis* / *amyloliquefaciens*-Stämme im Bezug auf die Phosphor-Aufschlüsselung durch extrazelluläre Phytaseaktivität in der Lage sind, das Wachstum der Maispflanzen (*Zea mays*) zu unterstützen (IDRIS 2002). Das wird geschehen, wenn es zu geringe Konzentrationen an Nährstoffen im Rhizosphärenbereich gibt, die normalerweise für die Pflanze nicht verfügbar sind. Man geht davon aus, dass infolge einer Inokulation mit wachstumsstimulierenden Rhizosphärenbakterien eine verbesserte Erschließung von Mikro- und Makronährstoffen (z. B. erhöhte Stickstoffaktivität oder Phosphatmobilisierung) hergestellt wird, die zur Wachstumsförderung beitragen kann (SCHENCK 1991, JAHN 1998, RICHARDSON et al. 2001). Ebenfalls könnte die Umwandlung organischer Substanzen und Verbindungen im Boden durch Rhizobakterien, die für die Pflanze nicht verfügbar sind, in eine pflanzenverfügbare Form fördernd auf das Pflanzenwachstum wirken.

Antibiotikabildung

Verschiedene Antibiotika konnten durch *B. subtilis* produziert werden (LOEFLER et al. 1990) sowie KREBS et al. (1996, 1998).

In Boden mit hoher Feuchtigkeit und Sauerstoffmangel (günstige Bedingungen für das Wachstum von Pathogenen, schädlich für das Wurzelwachstum) wurde der Effekt der Stickstoffverfügbarkeit auf die metabolische Aktivität von Bakterien geprüft. Dabei konnten *Bacillus subtilis* MB1600 und MB1205 unter anaeroben Bedingungen antagonistische Wirkungen gegen einige bodenbürtige Schaderreger wie *Rhizoctonia solani*, *Pythium ultimum* und *F. oxysporum* erreichen, falls genügend Stickstoff im Nährmedium anwesend war. Der Wirkmechanismus von *B. subtilis* ist wahrscheinlich auf die Produktion von Antibiotika (AFV), welche aber durch Nitratzugabe und -Umwandlung im Rhizosphärenbereich zu Nitrat (NO_3^-) gefördert worden war (Nitrat-Respiration), zurückzuführen (KNOX et al. 2000).

EDWARDS et al. (2001) sprachen über die Produktion von Cramizidin S durch *Bacillus brevis* und die Aktivität gegen den Pathogen *Botrytis cinerea* bei chinesischem Kohl (*Brassica chinensis*). *In vitro* wurden dabei inhibierende Wirkungen nach der Introduktion von *B. brevis* Nagano festgestellt. Das Ergebnis war vergleichbar und identisch mit dem Einsatz von Gramizidin S.

In Japan fanden KANEDA und KAJIMURA (2002) antibiotische Wirkungen gegenüber vielen Schaderregern wie Pilzen und Bakterien aus dem mit PGPR besiedelten Rhizosphärenbereich von Knoblauch (*Allium annuum*) heraus. Darunter waren *Bacillus subtilis* FR-2 und *Bacillus polymyxa* KT-8. Die Bakterien bildeten Antibiotika, nämlich *Bacillopeptine* A, B, C und *Fusarizidin* A, B, C, D. Die antimikrobielle Aktivität von *Fusarizidin* war jedoch stärker gegen verschiedene Pilze wie *Fusarium oxysporum* sowie gegen gram-positive Bakterien z. B. *Staphylococcus aureus* und *Micrococcus luteus*.

MARTIN et al. (2003) sprachen über die Produktion von Mattacin (identisch mit Polymyxin M) durch *Paenibacillus kobensis* M. Dieses Antibiotikum wies eine antibakterielle Wirkung gegen gram-positive und gram-negative Bakterien, darunter einige menschliche Bakterien und pflanzliche Pathogene auf, wobei das Ergebnis mit dem durch Polymyxin B (kommerzielles Antibiotikum) vergleichbar war.

Zu den Stoffwechselprodukten von *B. subtilis* gehören außer den Antibiotika weitere Proteine bzw. Proteinkomplexe (BOCHOW 1998), Proteasen und Ammonium (FZB Biotechnik GmbH 1995), die besonders bei der Interaktion mit Pflanzen resistenzinduzierend wirken. Deshalb wurden *B. subtilis*- Isolate für den Einsatz zur biologischen Schaderregerbekämpfung empfohlen.

Hemmung bodenbürtiger Krankheitserreger

Aus der Literatur geht hervor, dass *B. subtilis* erfolgreich gegen pilzliche, bakterielle sowie virale Pathogene und Nematoden erprobt wurde. *B. subtilis* stimuliert Abwehrkräfte der Pflanze gegen bodenbürtige Krankheitserreger (z. B. *Rhizoctonia*, *Streptomyces*, *Fusarium*).

Das Bakterium produziert biologisch aktive Substanzen wie Enzyme (IDRIS 2002), Siderophoren (LEEMAN et al. 1996), Lipopolysaccharide (NEWMANN et al. 1995), Lipopeptide (DUTMAN et al. 1999, STELLER et al. 1999), Vitamine und Phytohormone, besonders Antibiotika, die phytopathogene Pilze hemmen können (FRAVEL 1988, MEYER

& HÖFTE 1997, BOCHOW 1998).

Der Schutz der Pflanzen vor bodenbürtigen Schaderregern durch Inokulation mit *Bacillus subtilis* wurde oft nachgewiesen. Die meisten Bekämpfungserfolge durch *B. subtilis*-Einsatz gibt es gegen pilzliche Phytopathogene. So schrieben PODILE & PRAKASH (1996) über einen Bekämpfungserfolg gegen *Aspergillus* sp. ABOU-SHAAR (1988) und HENTSCHEL & BOCHOW (1990) berichteten über eine deutliche Reduzierung der Korkwurzelkrankheit (*Pyrenochaeta lycopersici*) der Tomate (*Lycopersicon esculentum*) im Gewächshaus.

Eine bemerkenswerte Wirkung erzielten auch NEMEC et al. (1996) gegen den Erreger der Fusarium-Stengel und Wurzelfäule (*F. oxysporum* f.sp. *radicis- lycopersici*) der Tomate durch die Applikation der *B. subtilis*-Präparate “Quantum 4000 HB[®]“ und Kodiak[®], die in den USA zugelassen sind. Ihre Wirksamkeit konnte durch eine Kombination mit *Trichoderma harzianum* noch weiter verbessert werden.

Durch die Bildung von Bacitracin, Botrycidin, Rhizocticin, Iturin-ähnliche Komponenten durch *B. subtilis* YM 10-20 stellten ZUBER et al. (1993), MUNIMBAZI und BULLERMAN (1998), CHITARRA et al. (2003) inhibierende Wirkung gegen *Penicillium roqueforte*, *Aspergillus* sp und *Fusarium* spp. fest.

In Japan schrieben KONDOH et al. (2001) über einen integrierten Bekämpfungserfolg durch *B. subtilis* RB14-C und Butolanil (chemische Pestizide) gegen den Pathogenen *Rhizoctonia solani* bei Tomaten (*Lycopersicon esculentum*) im Gefäßversuch.

Dank seiner genetischen Eigenschaften konnte der selektierte *B. subtilis*-Stamm D1/2 bzw. seine Kulturfiltrate als Folge eines phenotypischen Testes durch seine 16S RNA-ribosom Gene (rDNA) *in vitro* bemerkenswerte Bekämpfungserfolge bringen. Dabei wurde das Zellenwachstum pilzlicher Phytopathogene wie z. B. *Fusarium graminearum*, *Ascomyceten* sowie *Basidiomyceten* bei Klee (*Medicago sativa*) aktiv gehemmt CHAN et al. (2003).

In Russland wurden Alirin B und Alirin S als Biopräparate (Antibiotika) auf der Basis der Kulturfiltrate von *Bacillus subtilis*-10 VIZR und *Streptomyces felleus*-8 VIZR entwickelt. Diese neuen Biopräparate wurden bei verschiedenen Feldgemüsen wie Gurken (*Cucumis sativus*), Tomaten (*Lycopersicon esculentum*) und Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) getestet. Die Applikation dieser Bio-Produkte löste eine Befallsreduktion mit induzierter Resistenz gegen zahlreiche Schaderreger wie *Fusarium species*, *Rhizoctonia solani*, *Phoma exigua*, *Verticillium dahliae*, *Ascochyta melonis*, *Alternaria brassicicola*, *Botrytis cinerea* aus und

zugleich war bei den getesteten Pflanzen Ertragsteigerungen mit giftfreien Produkten zu verzeichnen NOVIKOVA et al. (2003).

Ebenfalls konnte der phytopathogene Pilz *Rhizoctonia solani* an Sojabohne (*Glycine max*) (RACKE & SIKORA 1985), Erbse (*Pisum sativum*) (HWANG & CHAKRAVARTY 1992, GANTCHEVA 1993), Kartoffel (*Solanum toberusum*) (SCHMIEDEKNECHT 1993, VIRGEN-CALLEROS et al. 1996), Tomate (*Lycopersicon esculentum*) (ASAKA & SHODA 1996) und Erdnüssen (*Arachis hypogaea*) (TURNER & BACKMAN 1991) durch den *B. subtilis*-Einsatz erfolgreich unterdrückt werden.

Im Weiteren wurde auch von einer antibakteriellen Leistung des Nutzbakteriums gegen andere phytopathogene Bakterien berichtet. Sowohl im Gewächshaus als auch im Freiland führte eine *B. subtilis*-Behandlung nach SCHMIEDEKNECHT et al. (1995) zur deutlichen Bekämpfung des Kartoffelschorfes *Streptomyces scabies*.

KEGLER (1993) schrieb über die Bekämpfung von verschiedenen phytopathogenen Viren wie dem Tabakrattle-Virus (TRV) an *Chenopodium quinoa*, dem Tabakmosaik- Virus (TMV) an *Nicotiana glutinosa*, dem nekrotischen Ringflecken-Virus der Kirsche (PNRV) *Prunus* spp. und dem Gurkenmosaik –Virus (CMV) an *Cucumis sativus* durch den Einsatz von *Bacillus subtilis*.

Ebenfalls stellten (GUPTA & VYAS 1989, SRIVASTAVA et al. 1990) Insektizidwirkungen nach einer Anwendung von *B. subtilis* fest. Doch damit ist das Leistungspotenzial dieses Bakteriums nicht erschöpft.

Es wurden des Weiteren in einer pakistanischen Studie zweiunddreißig Isolate von *Pseudomonas aeruginosa* und *B. subtilis* aus der Rhizosphäre und Rhizoplane von Wild- und Kulturpflanzen isoliert und auf ihre Aktivität unter Labor-, Gewächshaus- und Feldbedingungen geprüft. Das Ergebnis zeigte, dass die Stämme nicht nur Nematizidwirkung durch Tötung der Larven von *Meloidogyne javanica* in zweiter Phase hatten, sondern sie bewirkten auch inhibierend auf das pathogene Wachstum von *Macrophomina phaseolina*, *Fusarium solani* und *Rhizotonia solani*. Die antagonistische Wirkung von IE-2 und IE-6 von *P. aeruginosa* und *B. subtilis* führte dabei zur Vitalitätsverbesserung der Pflanzen. Infolgedessen waren Wachstumsstimulation und mehr Erträge bei *Phaseolus vulgaris* zu verzeichnen (SIDDIQUI et al. 2001).

Toleranz und Resistenzinduktion

Es liegen Beweise dafür vor, dass die Behandlung von Pflanzen mit synthetischen Phytohormonen zu induzierter Resistenz führen kann (DAVIS & DIMOND 1956). Die Erhöhung der Kompensationsfähigkeit der Pflanzen und ihrer Widerstandskraft gegenüber Phytopathogenen (ROSENKRANZ 1996), Parasitismus sowie Resistenz- und/oder Toleranzinduktion bei Pflanzen wurden von PHILIPP (1988) sowie CHET et al. (1990) festgestellt.

Die Wirkung nicht nur direkt gegen einen Schadorganismus, sondern auch über die Pflanze ist dafür verantwortlich, dass mit einer Introduktion des Nutzbakteriums auch in Abwesenheit von Phytopathogenen eine Erhöhung der Biomassenproduktion der Kulturpflanze, mit der oftmals eine Ertragserhöhung einhergeht, sowie eine größere Toleranz gegenüber biotischen und abiotischen Stressoren erreicht werden kann (KOCH 2001, ZIMMER 2003).

Auch bei seiner Untersuchung *in vivo* vermutete ISSOUFOU (2000), dass die antagonistische Wirksamkeit des Nutzbakteriums wesentlich auf Resistenzinduktion in den behandelten Pflanzen zurückgeht.

Allerdings ist der verbesserte Gesundheitszustand nach der Behandlung mit *Bacillus subtilis* eine mögliche Ursache für Toleranz der Pflanzen gegenüber Phytopathogenen. STEINER (1990) konnte durch *B. subtilis*-Kulturfiltrate eine Resistenzinduktion bei Pflanzen gegenüber obligat biotrophen Pilzen hervorrufen.

Kulturfiltrate bzw. biologisch aktive Fraktionen aus den Kulturfiltraten von *B. subtilis*-Isolaten (FZB 24 und FZB 14) lösten eine induzierte Toleranz und/oder Resistenz gegen *F. oxysporum* bei Tomate (*Lycopersicon esculentum*) unter axenischen Bedingungen aus. Die damit behandelten Pflanzen zeigten ein besseres Wachstum als die Kontrolle (DOLEJ 1998).

Eine induzierte Toleranz wurde ebenfalls durch Anwendung der Kulturfiltrate und biologisch aktiver Fraktionen gegen ein unspezifisches Toxin (Fusarinsäure) bei Kalluskulturen von Tomate (*Lycopersicon esculentum*), Lärche (*Larix* spp.) und Möhren (*Daucus carota*) erzielt (ALEMAYEHU 1997).

Eine erhöhte Widerstandsfähigkeit der Pflanzen wurde nach Blattapplikation einer aus extrazellulären Stoffwechselprodukten gewonnenen Elicitorfraktion eines *B. subtilis*-Isolates festgestellt (STEINER et al. 1988, KEHLENBECK et al. 1992, KRASKA et al. 1992, PODILE 1996). Weiterhin berichteten mehrere Autoren von der Induktion systematischer

Resistenz durch *Bacillus subtilis*. MAISS (1987) konnte durch die Anwendung zellfreier Kulturfiltrate von *B. subtilis* eine induzierte Resistenz gegen Viren an Gurken (*Cucumis sativus*) und Gerste (*Hordeum vulgare*) herbeiführen.

Induzierte Resistenz gegen pilzliche, bakterielle und virale Pathogene äußert sich oft mit erhöhten Aktivitäten von Chinitase, 1,3- β -Glucanasen und der Bildung von PR-Proteinen (Pathogen related) (VAN LOON und VAN STRIEN 1999), Polyphenoloxidasen (PPO), Peroxidasen und Phenylalanin-Ammoniumlyasen (PAL) (PODILE & LAMI 1998), der Akkumulation von antimikrobiellen Substanzen wie Phytoalexinen, und/oder der Bildung von physikalischen Abwehrbarrieren (Lignifizierung, Kallusbildung, Thylenbildung usw. (HAMMERSCHMIDT & KUC 1995).

Ein Antistress-Effekt gegen abiotische Umweltfaktoren wurde auch nachgewiesen. In einem Feldversuch in Sinai- Ägypten, wo es Salzboden gibt, sprachen BOCHOW et al. (2001) über Wachstumsstimulation und Salzstress-Toleranz bei zwei Sorten von Aubergine (*Solanum melongena*) und Paprika (*Capsicum annuum*) unter Bewässerung mit salzigen Grundwasser durch Einsatz von *B. subtilis* FZB 24. Dabei erfolgte die Anwendung von *Bacillus subtilis* zur Wurzelbakterisierung durch Angießen der Setzlinge mit einer Sporensuspension von 10^8 Sporen/ml. Nach 8-wöchiger ortsüblicher Pflanzenkultur wurde für 4-Wochen der Ertrag (kg/m^2), die Zahl der Früchte je Pflanze, Fruchtfrischgewichte, Prozentsatz Fruchttrockenmasse sowie die Fruchtgröße der Gemüse bei den Testvarianten ermittelt. Im Vergleich zu den salzfrei bewässerten Kontrollen wurde einheitlich bei beiden Gemüsearten und -Sorten durch Bewässerung mit salzigem Wasser die Ertragsleistung der Pflanzen um über 90 % reduziert.

Nach der Applikation von *B. subtilis* wurde der Ertrag bei den salzbewässerten Aubergine-Sorten auf das 5 $\frac{1}{2}$ fache erhöht und bei den Paprika-Sorten um das 4,3 fache, gegenüber der unbehandelten Kontrolle. Auch bei allen Pflanzenwachstums-Parametern führte die Pflanzenbakterisierung zu signifikanten Verbesserungen. Der Bakterieneinsatz resultierte damit bei der Aubergine in einer Verlustreduzierung um etwa die Hälfte, beim Paprika in 25 % verminderten Verlusten und damit pflanzenart-spezifisch unterschiedlich stark- in einer erheblichen Erhöhung der Salzstress-Toleranz der behandelten Pflanzen.

Um nach *B. subtilis*-Einsatz induzierte Toleranz gegen Salzstress festzustellen, wurde mit Auxin-Präkursoren, IAA bei Tomatensämlingen unter kontrollierten, axenischen, salzstress-Situationen geprüft. Das Testergebnis war dem Feldversuch vergleichbar.

Induzierte Toleranz gegen abiotischen Stress wie Frost bei Tabak (*Arabidopsis thaliana*) konnte festgestellt werden KONSTANTINOVA et al. (2002). Auslöser dieser Resistenz war die Akkumulation von Prolin, Fructan oder β -Glycine betaine. Die Kultur erfolgte in einer Zusammensetzung aus Arabidopsis- oder vigna-Gene Fragmenten (AtP5Cs, Vac P5 Cs) für Delta (1)-pyroline-5-carboxylate synthetase Produktion, Sac B Gene Kode für Levansucrase von *B. subtilis* oder Kode A Gene von Choline oxidase von *Arthrobacter globiformis*. Die Reaktion auf die Minusgrade von Temperatur und osmotischem Stress folgte bei Generationen der Nachkommenschaft. Als verantwortlich für die Frosttoleranz war die Akkumulation von biosynthetischen Substanzen wie, Prolin, Fructan oder β -Glycine Betaine.

Reduzierung des Befallgrades durch Pathogene

Die Wirkungsmechanismen von *B. subtilis* zur Unterdrückung von Phytopathogenen beziehen sich auf Prozesse der Antibiotika und der Konkurrenz um Raum und Nährstoffe (RYTTER et al. 1989, SINGLAIR 1989).

OBIEGLO et al. (1990) konnten den Befall von Edelnelken (*Dianthus annus*) mit dem Erreger der Fusarium-Welke (*Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi*) sowie *Phytophthora nicotiana* var. *nicotianae* an Tomate (*Lycopersicon esculentum*) (BOCHOW 1992, WANDKE & BOCHOW 1992) unter hydroponischen Anbaubedingungen wirksam bekämpfen.

BERGER et al. (1996) sprachen von einer deutlichen Befallsreduzierung bei *Pythium* und *Phytophthora* an verschiedenen Kulturpflanzen durch *Bacillus subtilis*. Auch SIDDIQUI & MAHMOOD (1995) erzielten eine signifikante Reduzierung der Wurzelfäulekrankheit (*Macrophomia phaseolina*) an Kichererbsen (*Cicer aritinum*) und eine Befallsreduktion von *F. udum* an Traubenerbse (*Cajanus cajan*) durch Saatgutbehandlung mit *B. subtilis*.

Ferner führte eine Behandlung mit *Brevibacillus* spp.1 und *B. subtilis* 16 bei Kartoffeln (*Solanum toberusum*) und Winterweizen (*Triticum vulgaris*) zur Minderung des Befalles mit dem Pathogenen *R. solani* und *Fusarium graminearum* und brachte zugleich bis zu 20 % mehr Ertrag. Der Wirkmechanismus war auf die Bildung von verschiedenen biologisch aktiven Substanzen durch den Antagonisten zurückzuführen AZIZBEKYAN et al. (2001).

Ein *Bacillus subtilis*- Isolat 25021, ursprünglich von reifen Erdbeerfrüchten (*Fragaria visca*)

isoliert, konnte *Botrytis cinerea*, den Erreger des Grauschimmels an der Erdbeere, in Labor und Feldversuchen erfolgreich unterdrücken. So ermittelten HELBIG & BOCHOW (2001) in dreijährigen Feldversuchen (1997-1999) durch eine Behandlung der Erdbeerpflanzen mit *B. subtilis* während der Blüte eine Reduktion des Grauschimmelbefalls an reifen Früchten zwischen 16 und 40 % im Vergleich zur Wasserkontrolle.

BONATERRA et al. (2003) konnten in Spanien den Befall mit *Monilia laxa* und *Rhizopus stolonifer* Nacherntekrankheiten bei Steinobst wie Aprikose (*Prunus armeniaca*), Pfirsich (*Prunus persicae*) und Nektarinen (*Prunus amygdalus*) nach einer Applikation von *Pantoea agglomerans*- Stamm EPS 125 signifikant reduzieren. Dies geschah je nach Dosierung, wenn beide (Antagonist und Pathogen) direkt im Saft kultiviert waren. Der Antagonismus zwischen ESP 125-Isolat und Pathogenen wurde diskutiert und wahrgenommen vermutlich als Biomechanismus zur Bekämpfung von *Monilia laxa* sowie von *Rhizopus stolonifer* während der Späternte.

Nicht zuletzt fand auch das Bakterium in der Holzindustrie Verwendung gegen den holzverfärbenden Pilz *Ophiostoma picea* auf *Pinus ponderosa*-Splintholz. Die Stärke der Verfärbung und die Enzymaktivität wurden in den Proben mit *B. subtilis* im Vergleich zu der unbehandelten Probe signifikant herabgesetzt. Obwohl der Einfluss der Applikation von *Bacillus subtilis* auf die Enzymaktivität von *O. picea* und seine Fähigkeit, Holz zu verfärben erheblich war, konnten jedoch die Bakterien die Pilzverfärbung nicht völlig hemmen (SILVA & MORELL 1998).

Das Phänomen einer Befallsreduzierung verbunden mit einer Wachstumsstimulierung nach *B. subtilis*-Anwendung, beobachteten auch SCHMIEDEKNECHT et al. (1995). *B. subtilis* hat damit nicht nur einen Bekämpfungseffekt gegenüber phytopathogenen Krankheitserregern, sondern auch Einfluss auf Wachstum und Gesundheit der Pflanzen. In einigen Fällen trat sogar eine Verfrühung der Ernte auf (HENTSCHEL u. BOCHOW 1990, FZB 2002).

2.3.3. *Lactobacillus*

2.3.3.1. Charakterisierung von *Lactobacillus*

Die Laktobazillen bzw. Milchsäurebakterien werden in der Familie der *Lactobacillaceae* zusammengefasst. Dazu gehören die Gattungen *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* und *Streptococcus thermophilus* (SCHLEIFER 1987).

Alle Angehörigen sind grampositive, katalasenegative Bakterien, die meist unbeweglich sind und keine Sporen bilden (ROOS et al. 1999). Aufgrund der Zellgestalt und anderer morphologischer sowie physiologischer Eigenschaften sind die meisten Laktobakterien gestreckte zylinderförmige Stäbchen mit regelmäßiger Gestalt. Darüber hinaus sind sie mesophil, chemoorganotroph, fakultativ anaerob bzw. mikroaerophil und wachsen nur im komplexen Nährmedium. Sie besitzen keine Häminpigmente (SONENSHEIN et al. 1993).

Milchsäurebakterien können einen oberen Temperaturbereich von 30 bis 45 °C (thermische Stämme) vertragen, wobei das optimale Wachstum für *Lactobacillus* zwischen 20-30 °C schwankt. Sein Wachstumsoptimum liegt bei pH-Werten von 3,5 bis 5,4 (SCHRÖDER & BAUMANN 1991). Mit den hohen Nährstoffansprüchen und der Art der Energiegewinnung (reine Gärung) steht die Verbreitung der Milchsäurebakterien in der Natur im Zusammenhang. Sie können sich überall dort vermehren, wo hohe Konzentrationen an Kohlenhydraten, Proteinabbauprodukten und Vitaminen vorhanden sind und ein niedriger Sauerstoffdruck herrscht (SHARPE & PETTIPHER 1983). Zur Energiegewinnung sind sie durchweg auf Kohlenhydrate angewiesen und scheiden Milchsäure (Lactat) aus.

Laktobazillen besitzen die Fähigkeit, auf der Oberfläche von Pflanzen zu wachsen und werden dort auch regelmäßig angetroffen (MUNDT 1970). Die Zahl der Milchsäurebakterien liegt meist im Bereich von nur 10-1000 Zellen/g, steigt jedoch mit dem Grad der Pflanzenreife an. Auf der Blattoberfläche von Pflanzen lassen sich im allgemeinen nicht so viele Milchsäurebakterien finden, ebenso wie auf Blüten und Früchten (DAESCHEL et al. 1987). Besonders an Stellen, wo Pflanzensaft freigesetzt wird, z. B. an Schnittflächen nach der Ernte, finden Milchsäurebakterien sehr gute Wachstumsbedingungen vor und vermehren sich dort dementsprechend (MUNDT & HAMMER 1968).

Durch Bildung großer Mengen Lactat und aufgrund ihrer Säuretoleranz setzen sich Milchsäurebakterien unter geeigneten Milieubedingungen rasch durch. Es ist daher leicht, Milchsäurebakterien auf selektivem Nährboden anzureichern und zu isolieren. „Natürliche Reinzuchten“ liegen in Sauermilch und Milchprodukten, Sauerteig, Sauerkraut, Silage und an vielen anderen ähnlichen Standorten vor (HAMMES 1990, EHRMANN 1994).

Nach ihrer Eigenart, Glucose entweder zu Lactat oder daneben auch zu anderen Gärprodukten und Kohlendioxid zu vergären, teilt man die Laktobakterien in homofermentative und heterofermentative ein (SCHLEGEL 1992). Eine erste taxonomische Einteilung wurde bereits von ORLA JENSEN (1919) vorgenommen.

2.3.3.2. Wirkungsmechanismen von *Lactobacillus*

Von der Frühgeschichte der Menschheit an bis hin zur modernen Lebensmitteltechnologie wurden diese Bakterien unbewusst oder bewusst zur Fermentation von Nahrungs- und Futtermitteln eingesetzt und deren Qualität verbessert und/oder ihre Haltbarkeit verlängert (TEUBER 1993, ARICI 1997).

Die Anwendung der Milchsäurebakterien in der Landwirtschaft ist zur Zeit sehr vielfältig. Nach HIGA (unveröffentlicht) entfaltet sich die Wirkung dieser Mikroorganismen über:

1. Die Pflanzenstärkung: Gesunde Pflanzen entwickeln sich schneller,
2. Ertragsteigerungen,
3. Bodenverbesserung mit dem Ergebnis einer gesunden Bodenflora, die für den Pflanzenbewuchs Vorteile bringt,
4. die Förderung einer schnellen Zersetzung und Vergärung von organischem Material,
5. Nährstoffe im Boden werden besser aufgeschlossen,
6. die Unterdrückung schädlicher Mikroorganismen sowie Pilze (*Fusarium*) und Nematoden und
7. die Produktion von Milchsäure aus Zuckern und anderen Kohlenhydraten.

Neben der Nutzung der konservierenden Wirkung ihrer Stoffwechselprodukte wie Milchsäure, Alkohol und Bacteriocinen-Substanzen, die das Wachstum anderer Bakterien

einschränken oder ganz verhindern können (LINDGREN & DOBROGOSZ 1990) – werden Laktobakterien auch zur Aufwertung von Nahrungsmitteln durch Produktion von Aromen (z.B. Diacetyl in Butter), Vitaminen und Aminosäuren, aber auch zur Entfernung unerwünschter Stoffe eingesetzt.

Am meisten kommen Milchsäurebakterien im Bereich der Lebensmittelproduktion zum Einsatz. In der Literatur sind Untersuchungen über den Wirkmechanismus von Milchsäurebakterien zur Pflanzenstärkung bisher offiziell noch nicht beschrieben worden, trotzdem ist es wünschenswert, sie zu erforschen und besonders in die Beziehung solcher Mikroorganismen zum Pflanzenwachstum zu vertiefen.

Die antagonistische Wirksamkeit von *Lactobacillus* gegenüber Pathogenen basiert meist auf der Konkurrenz um Raum und Nährstoffe sowie auf der Bildung verschiedener antimikrobieller Substanzen, wie organische Säuren, Hydrogenpyroxidase, Diacetyl und Bacteriocin sowie sonstigen Antibiotika (HAMDAN et al. 1974, LINDGREN & DOBROGOSZ 1990, MÜLLER et al. 1996, OUWEHAND 1998).

Über die Produktion von bacteriocin-ähnlichen Substanzen durch *Lactobacillus*, womit die antibakterielle Wirkung isolierter Laktobazillen IMC-1 aus der Mongolei stammendem Käse gegen Lebensmittelverderber hervorgerufen wurde, schrieben MIYAMOTO et al. (1998). Dabei wurden Bakterien aus der *Lactobacillus acidophyllus* –Gruppe in Nährlösung 10 % aus Skimmilch bei pH 4,5 und 0,5 % Fermentextrakt, 0,5 % Glucose unter sterilen Bedingungen (15,000 U/min, Fermentationszeit 3-5 Tage) kultiviert. Als Testmikroorganismen kamen *Escherichia coli*, *Pseudomonas fragi*, *Staphylococcus aureus* zum Einsatz.

Als Antibiotikum ist Patulin bekannt, da Patulin gegen verschiedene gramnegative Bakterien bakteriozid wirkt (FRANK 1970). Die Substanz erwies sich jedoch bei klinischen Untersuchungen als zu toxisch LINDROTH (1980).

Nach DEL RIO et al. (2003) hatten möglicherweise Phenolkomponenten wie *Oleuropein*, *Catechin* und *Tyrosol*, die aus dem Fruchteextrakt der Olivenpflanze (*Olea europaea* L.) isoliert waren, antagonistische Wirkungen gegen *Phytophthora* sp. Der Anstieg im Phenolgehalt in den Pflanzengeweben (Blattzellen, Kortexzellen) wurde nach einer Blattbehandlung mit 0,3 % Brotomax festgestellt. Die Phenolkomponenten übten in Vitro-

Kulturverfahren einen inhibierenden Einfluss auf das Pilzwachstum von *Phytophthora* sp. aus. In der Effektivität war das *Tyrosol* am stärksten, gefolgt wurde von *Catechin* und *Oleuropein*. Zuvor war die Bildung gleich aktiver Substanzen durch *Lactobacillus plantarum* bekannt, was vermutlich als Ursache für den Antagonismus denkbar ist (MARSILIO et al. 1998).

Ferner wurden *Lactobacillus plantarum*-Isolate VTT E-78076 (E76) und VTT E-79098 (E98) auf ihre Aktivität gegen verschiedene *Fusarium species* geprüft LAITILA et al. (2002). *In vitro* konnten die Laktobazillen *Fusarium avenaceum*, *F. culmorum*, *F. graminearum* und *F. oxysporum* erfolgreich hemmen. So waren bei der Ermittlung von Hemmungsgraden große sortenspezifische Unterschiede zwischen Fusarien-Arten je nach Bakterien-Stamm bemerkbar. Dies wurde durch Labortests aufgrund der Gerstenkultur bestätigt. Das Ergebnis bietet neue Impulse für die biologische Bekämpfung von Pathogenen bei Gerste an.

Die antibakterielle Fähigkeit von Laktobazillen ist ausführlich von STILES (1996) und SALMINEN & VON WRIGHT (1998) beschrieben worden. Zuvor zeigten Untersuchungen der Biotechnologie über VTT antagonistische Wirkungen von *Lactobacillus* gegen gramnegative Bakterien und Pilze (HAIKARA et al. 1993, HAIKARA & MATTILA-SADHOLM 1994).

Von großer Bedeutung ist auch die Fähigkeit der Milchsäurebakterien, unter ungünstigen Bedingungen zu überleben (Adaption) und sich zu kolonisieren. Dies spielt eine wesentliche Rolle im Bereich der Lebensmittelverarbeitung und der Lagerstabilität in Bezug auf Prozesse des Einfrostens und Trocknens (GUCHTE et al. 2002).

Die Entwicklung von neuen Abwehrmechanismen, wie Impfstoffen Vaccinen WELLS et al. (1996), MERCENIER et al. (2000) und Probiotik (DUNNE et al. 1999, SCHIFFRIN et al. 2001) führten zur Toleranzinduktion und machten dabei die Laktobazillen robust und widerstandsfähig gegenüber ungünstigen Umweltfaktoren. Die bakterielle Stressreaktion ist ein integriertes Regulationssystem erstens auf Basis von Genänderungen, was zu inneren Veränderungen in der Zellstruktur (z. B. Zellteilung, DNA-Metabolite, Hormonhaushalt, Aufbau der Feingewebe, Transport, etc.) beiträgt, und zweitens unter Mitwirkung bei der Toleranzinduktion (STROTZ et al. 2000). Dennoch bleibt der Antistress-Effekt artspezifisch und variiert je nach Typ des Stresses (Säure-, Trocken- bzw. Kältestress). Deshalb ist die Gewinnung neuer Erkenntnisse über die Stressreaktion von *Lactobacillus* wünschenswert.

3. Problem- und Zielstellungen

Die Bedingungen für ein optimales Pflanzenwachstum im Gleisbett sind häufig nicht vorhanden. Aus diesem Grund sollten Lösungen gefunden werden, um den bisherigen unbefriedigenden Zustand von Vegetationssystemen im Gleisbett entsprechend zu modifizieren. So hat ein Einsatz von *Bacillus subtilis* wiederholt bewiesen, dass negative Auswirkungen von Stressbelastungen auf extrem urbanen Standorten positiv beeinflusst werden kann. Daher sollte hier geprüft werden, inwiefern spezifische *Bacillus subtilis*- und *Lactobacillus*-Stämme in der Lage sind, das Pflanzenwachstum unter den Bedingung von Gleisbettanlagen zu fördern.

Das Hauptziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Begrünungsmethode mit beschleunigter Vegetationsentwicklung und hoher Trockenstresstoleranz der Sedumpflanzen durch Einsatz von *B. subtilis*, *Lactobacillus* und Nährsubstrat (allein und kombiniert) bei verschiedenen Vegetationssystemen auf dem speziell nährstoffarmen Standort Gleisbett. Insbesondere sollte nach der Applikation von Bakterien und Nährsubstrat mit einem entsprechend aufgebauten Pflanzensubstrat eine schnellere Bedeckung und bessere Entwicklung der Vegetation ermöglicht werden. Es standen dabei folgende konkrete Fragestellungen in Mittelpunkt:

- ❖ Ist der Einsatz von Pflanzenstärkungsmitteln wie *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowie von Nährsubstrat auf das Wachstum der Sedumvegetation wirksam?
- ❖ Wie kann die Einzelapplikation von Bakterien das Pflanzenwachstum gegenüber der kombinierten Anwendung von Bakterien mit dem Nährsubstrat beeinflussen?
- ❖ Besteht eine Beziehung zwischen Applikationszeitpunkt der Mikroorganismen und der Wachstumsbeeinflussung von Pflanzen?
- ❖ Zeichnen sich an den Pflanzen Unterschiede bei einmaligen und zweimaligen Behandlungen ab?
- ❖ Gibt es zusätzliche Differenzen im Bezug auf die Wachstumsförderung durch die Anwendung verschiedener Konzentrationen von *Bacillus subtilis*?
- ❖ Wie wirkt sich Kompost in Konzentrationen von 10 und/oder 20 Vol.-% auf das Pflanzenwachstum aus?
- ❖ Welche Vorteilswirkung auf die Wuchsleistung hat die Nährsubstrat-Applikation?
- ❖ Wie schnell können Sedumsprosse das Gleisbett besiedeln?

Weitere wesentliche Überlegungen sollen in der Suche nach Möglichkeiten für mehr Grün und Verbesserung des Wohnumfeldes im Innenstadtbereich unter Beibehaltung der aktuellen Flächennutzung bestehen. Im Vordergrund steht hierbei, die vegetativen Defizite in den hoch verdichteten Stadtteilen zu kompensieren und damit Umweltbelastungen abzubauen.

Darüber hinaus sind auch heutzutage die ansteigenden Forderungen von Öffentlichkeit und Stadtplanern nach einer stärkeren Berücksichtigung von ökologischen Aspekten bei der Gestaltung der Städte einzubeziehen. Als Alternative zum grauen Schotter und Beton sollte dementsprechend ein als Pflanzenstandort geeignetes Bauelement im Bereich der Vegetationssysteme im Gleisbett eingeführt werden, das in seiner Herstellung besonders umweltschonend und preisgünstig ist.

Bei der Gleisbett-Naturierung nehmen unter den sukkulenten Pflanzen vorzugsweise die vielgestaltigen *Sedum*-Arten mit einem prächtigen Farbenspiel einen weiten Raum ein. Die daraus entstandenen geschlossenen Pflanzenbestände setzen sich mit ihrem Flächenwachstum häufig aus *Sedum album* mit *Sedum acre*, die oft mit *Sedum sexangulare* vergesellschaftet sind, sowie von *Sedum reflexum* und *Sedum spurium* zusammen. Es sind vorwiegend gut wüchsige Pflanzen mit schönen Blüten und guter Gruppenwirkung.

Auffällig dabei ist, dass sich die Pflanzen im Gesamtbestand mit ihrem üppigen Wuchs zu quasi bunten Blütenteppichen entwickeln werden, die schließlich bei dem Betrachten ihren eigenen Aspekt hinterlassen können. Das Gleisbett lässt sich somit durch solche vielfältige Gestaltung dauerhaft begrünen.

Um obige Aufgabenstellung entsprechend bearbeiten zu können, waren Untersuchungen in Freiland und in Klimakammern vorgesehen. Mit dem Ziel, verbesserte Wuchsleistungen durch die Bakterienbehandlungen nachzuweisen, sind auch in Ergänzung zu den bisher durchgeführten Versuchen Testmethoden erprobt worden.

Die Ergebnisse wurden hinsichtlich möglicher Wirkmechanismen für die pflanzenwachstumsfördernden und stressmindernden Wirkungen der applizierten Rhizobakterien *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* diskutiert.

4. Versuchsmaterial und Untersuchungsmethoden, allgemeines

4.1. Versuchssubstrate

4.1.1. Bestimmung der Nährstoffgehalte der verwendeten Substratarten

Zur Bestimmung der Nährstoffgehalte der verwendeten Substrattypen wurden monatliche Probenanalysen durchgeführt. Die angegebenen Werte repräsentieren jeweils den Mittelwert aus 5 Messungen. Analysiert wurden die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium. Die Nährstoffe im Extrakt werden entsprechend den in Methodenbuch VDLUFA, Bd.1 genannten Methoden (1991) bestimmt.

Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$): mit dem Microprocessor pH/mr- Meter „PH 196“ WTW GmbH-Weilheim, Deutschland. Nach dem Sieben der frischen Substratprobe auf <10 mm wurde Lösungs-Extrakt hergestellt. Es wurden 20 g Probenmaterial auf <10 mm Durchgang gesiebt mit 200 ml 0,01 CaCl_2 -Lösung in Flaschen 2h auf einer Schüttelmaschine extrahiert. Nach der Filtration wird der lösliche Gehalt an Stickstoff als $\text{NO}_3\text{-N}$ mit dem Microprocessor pH/mr gemessen.

Phosphor (P_2O_5): mit dem Spektralphotometer „Spekol 11“, VEB Carl Zeiss Jena, Deutschland.

Kalium (K_2O): mit dem Flammenphotometer PFP7 „Jenway“ Dunmow, England.

Die Substratproben wurden auf einen optimalen Wassergehalt eingestellt. Nach Siebung der Originalproben auf <10 mm, ca. 20 g Probenmaterial mit 200 ml Calciumlactat in den Flaschen 2h schütteln. Die löslichen Gehalte an Phosphor und Kalium werden nach Extraktion der frischen Substratproben mit einer durch Salzsäure auf pH 3,6 eingestellten Lösung von Calciumlactat im Verhältnis (1:10) bestimmt. Anschließend filtrieren und im Filtrat Phosphor spektralphotometrisch und Kalium flammenphotometrisch messen.

Salzgehalt (KCl)

Die Salzkonzentration als KCl wurde mit dem Leitwert-Messgerät GMH 3410, Geisinger electronic GmbH Regenstauf, Deutschland bestimmt. Es geschieht nach Extraktion der frischen Substratproben mit destilliertem Wasser Verhältnis (1:10). Die Originalprobe auf einen standardisierten Wassergehalt einstellen, mit dem Sieb auf <10 mm ca. 20 g mit 200 ml

Wasser in den Flaschen 2h bei 20 °C schütteln. Die Leitfähigkeitsmessung und Berechnung des Salzgehaltes als Kaliumchlorid aus der Differenz der Leitfähigkeiten der filtrierten Extrakte und der Extraktionslösung bestimmen.

Der pH-Wert

Die pH-Messung erfolgte mit dem pH-Messgerät von LANGE „ECM2“, GmbH Industriemesstechnik Düsseldorf, Deutschland. Der pH-Wert wird elektrometrisch in einer Suspension der Frischproben in 0,01 molarer Calciumchloridlösung (Verhältnis 1:10) bestimmt. Zu 20 g auf <10 mm gesiebttem Material werden 200 ml 0,01 molare CaCl₂-Lösung (Verhältnis 1:10) zugegeben. Der pH-Wert in der Suspension wird nach 1h mit dem pH-Messgerät ermittelt.

Ziegelbruchsubstrat

Das Substrat ist für die extensive Begrünung von Dächern geeignet und wurde durch die Firma Bauder Berlin geliefert. Es enthielt kaum pflanzenverfügbare Nährstoffe. Die Schichtdicke beträgt 4,5 cm. Die Ergebnisse der Substratanalyse sind in der Tab. (2) gezeigt.

Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil

Das Ziegelbruchsubstrat wurde hier mit Kompost gemischt. Beim Kompost handelt es sich um eine Mischung mit wenig bis mäßig und stark zersetztem Hochmoortorf und wird auf Wunsch mit sorptionsstarkem Ton angereichert. Der Kompost enthält die für das Pflanzenwachstum erforderlichen Haupt- und Spurennährstoffe. Das Mischverhältnis Ziegelsubstrat: Kompost betrug 90:10 %. Die Schichtdicke ist mit dem System des Ziegelbruchsubstrats identisch. Von diesem Gemisch wurden eigene Messungen ermittelt (Tab. 2).

Geotextilmatten

Das Substrat wurde durch das sächsische Institut für Textilien entwickelt. Die Matten (Mobilsystem) sind feststabil und reißen nicht, vor allem weisen sie eine hohe Strapazierfähigkeit, ähnliches Wasservermögen wie die Mineralwollmatten auf (HENZE 2003). Die Substratschichtdicke beträgt ca. 3 cm. Die Wasserhaltekapazität liegt bei 23 l/m² (SIEMSEN 2003). Die Nährstoffgehalte sind in der Tab. (2) enthalten.

Mineralwollmatten

Die Matten wurden durch die Firma Strotthof und Behrends Berlin hergestellt. Die Schichtdicke beträgt 2 cm. Angaben über Substrateigenschaften sind in der Tab. (2) enthalten.

Tab. 2: Laboranalysenwerte der verwendeten Substrattypen

Substrate	Untersuchungsparameter	Mittelwerte
Ziegelbruchsubstrat	Stickstoff (NO ₃ -N)	13,49 mg/kg
	Phosphor (P ₂ O ₅)	42,72 mg/100g
	Kalium (K ₂ O)	21,87 mg/100g
	Salz (KCl)	217 mg/100g
	pH-Wert	6,92
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	Stickstoff (NO ₃ -N)	0,425 mg/100g
	Phosphor (P ₂ O ₅)	0,07 g/l
	Kalium (K ₂ O)	0,13 g/l
	Salz (KCl)	0,41 g/l
	pH-Wert	6,05
Geotextilmatten	Stickstoff (NO ₃ -N)	8,51 mg/l
	Phosphor (P ₂ O ₅)	5,9 mg/l
	Kalium (K ₂ O)	126,63 mg/l
	Salz (KCl)	4,28 g/l
	pH-Wert	7,97
Mineralwollmatten	Stickstoff (NO ₃ -N)	3,57 mg/l
	Phosphor (P ₂ O ₅)	43,94 mg/l
	Kalium (K ₂ O)	420,6 mg/l
	Salz (KCl)	4,55 g/l
	pH-Wert	7,96

Da alle Substrattypen der Sedumvegetation kaum verfügbare Nährstoffe bieten, musste mit einer zusätzlichen Düngegabe gerechnet werden.

4.1.2. Bestimmung der physikalischen Substratbeschaffenheiten

Neben Nährstoffgehalten können auch physikalische Substrateigenschaften für den Erfolg eines Naturierungs- Verfahrens entscheidend sein. Besonders hoch sind die Anforderung an solche physikalischen Eigenschaften des Substrates wie Struktur, Temperatur und Feuchte (TAPIA SILVA 2002). Es wird davon nicht nur die Bewurzelungsqualität maßgeblich beeinflusst, sondern auch das Wachstum und Aktivitätsentfaltung der eingebrachten Bakterien (ZÜLLICH 1995, KILIAN et al. 1998).

Zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der verwendeten Substrattypen wurde ein Test vorgenommen. Die Testergebnisse bezüglich von Feuchtigkeit und Temperatur werden im Anhang an dieser Arbeit tabellarisch dargestellt.

Anhand von diesen Ergebnissen konnte inzwischen festgestellt werden, dass die höchsten Temperaturwerte im Sommer in Geotextilmatten und Mineralwollmatten abgelesen wurden, im Vergleich zu den niedrigeren Werten im voluminösen Ziegelbruchsubstrat.

Im Gegensatz dazu wurden die höchsten Temperaturwerte in Ziegelbruchsubstrat im Winter ermittelt. Dann kamen Geotextilmatten an zweiter Stelle, währenddessen waren die niedrigen Werte in Ziegelkompostsubstrat registriert worden.

Zur Bestimmung der Substratfeuchte wurden Gewichtsverluste an Feuchte in den jeweiligen Substratarten zwischen frühmorgens und nachmittags gemessen. Es ergaben sich daraus erst bei Mineralwollmatten, dann bei Geotextilmatten, größte Gewichtsverluste. Demgegenüber blieb der Gewichtsverlust beim Ziegelbruchsubstrat relativ geringer, zumal das letztgenannte Substrat durch die Stabilität seiner groben Struktur in der Lage ist, die Feuchtigkeit gut, im Unterschied zu Mineralwollmatten und Geotextilmatten zu leiten und zu halten.

4.2. Naturierungsverfahren

In den Untersuchungen zu Auswirkungen der Bakterienbehandlungen auf das Pflanzenwachstum wurden einheitlich Sprosse der Art *Sedum album* L. eingesetzt, die ursprünglich vom Gelände der Humboldt-Universität zu Berlin (Malchow) stammen, dann in 4 cm lange Sprossteile geschnitten und mittels Nassansaat auf die Substratoberfläche aufgetragen wurden. Abweichend davon kamen lediglich bei dem Münchener Versuch verschiedene *Sedum*-Arten zur Erprobung.

Um das Risiko der Verwehung von Sedumsprossen zu vermindern, erfolgte die Naturierung als Nassansaat unter Verwendung eines flüssigen Klebemittels aus kombinierten Materialien, wie Strohhäcksel, Baumwollmulch und Kleber. Dadurch wird die Vegetationsschicht verankert und die Begrünung hält problemlos stand (LIESECKE et al. 1989, BREUNING 1996). Dank der Mulchschicht werden gegebenenfalls gute Bedingungen für die Vegetationsentwicklung geschaffen. Da die verwendeten Substratarten nährstoffarm waren, wurde der Anspritzmasse auch eine Düngung mit Basacote- Mineraldünger beigegeben. Die Anspritzmasse setzt sich aus folgenden Materialien zusammen (vgl. Tab. 3).

Tab. 3: Bestandteile der verwendeten Anspritzmasse

Materialien	g/m ²
Strohfaserhäcksel	110
Baumwollmulch	70
Kleber	10
Sedumsprosse	100
Mineraldünger [Basacote [®] Plus 6M. 16+8+12(+2)]	50

Für die Effektivitätsprüfung wurden Nutzbakterien *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* verwendet. Es wurde freundlicherweise von der FZB Biotechnik GmbH (Berlin) das Produkt *Bacillus subtilis* FZB 24[®] zur Verfügung gestellt. Es war als Granulat formuliert und hatte eine Keimdichte von 5×10^{10} cfu/ml.

Das Bakterium von *Lactobacillus* und das Nährsubstrat wurden durch die Firma Dr. Felgenträger & Co u. A.&F. Hygiene GmbH (Bitterfeld) geliefert. Beide Stoffe befinden sich

in einem flüssigen Zustand. Das Nährsubstrat war als Rückstand der alkoholischen Gärung bekannt und hatte kommerziell den Namen Vinasse. Es wurde als Bodenhilfsmittel angewandt. Die Auftragsmengen werden in der folgenden Tab. 4 angegeben.

Tab. 4: Einsatzmengen von Bakterien und Nährsubstrat

	Behandlungsform	Einsatzmenge /m ²	Einsatzmenge /Parz.
<i>Bacillus subtilis</i>	2 l Wasser/m ²	0,8 g /m ²	0,8 g
<i>Lactobacillus</i> sp.	2 l Wasser/m ²	50 ml/m ²	50 ml
Nährsubstrat	2 l Wasser/m ²	50 ml/m ²	50 ml

4.3. Erfassung von Klimadaten

Die Messung der Klimadaten erfolgte in der Wetter-Station Berlin-Dahlem. Der Standort Berlin-Dahlem gehört zum Raum Berlin-Stadtrand. Dieser Ort liegt etwa 51 m über dem Meeresspiegel. Im Versuchszeitraum von Mai 03 bis zum Ende April 04 wurden Tageswerte (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Sonnenscheinstunden, Windrichtung und -Geschwindigkeit) bzw. Monatssummen der Niederschläge ermittelt. Dabei wurden folgende Einflussfaktoren als Mittelwerte erfasst:

Die Lufttemperatur betrug 10,54 °C.

Die relative Luftfeuchte war 70 %.

Die Anzahl der Sonnenscheinstunden lag täglich bei 5,5 h.

Der Wind wehte südwärts, dessen Geschwindigkeit war durchschnittlich 1,57 m/s.

Die jährliche natürliche Niederschlagsmenge betrug 465 mm.

4.4. Allgemeine Vorgehensweise

Die Untersuchungen im Freiland wurden einerseits auf einer planierten Ackerfläche in 14195 Berlin-Dahlem, Thaerweg, angelegt und andererseits in der Agnes-Bernauer Straße in München unter Gleisbettbedingungen durchgeführt. Es wurden bei den Einzelversuchen spezielle Methoden angewandt, wie in den jeweiligen Abschnitten gesondert aufgeführt. Die Vorgehensweise mit den Versuchsobjekten war insgesamt gleich.

4.4.1. Versuchsdurchführung

Bei der Anspritz-Naturierung wird ein Sprossengemisch mit einer wässrigen, mit Kleber versehenen Lösung zu einer homogenen Mischung aufbereitet und mittels Spritzaggregat als Nassansaat auf die Gleisbettoberfläche aufgetragen. Um einen homogenen Auftrag der Anspritzmasse zu erreichen, werden die Bestandteile der Anspritzmasse, wie Strohhacksel und Baumwollmulch, in stark zerkleinerter Form eingesetzt.

Die Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus*, Nährsubstrat erfolgten in Form einer Gießapplikation. Bei der Behandlung der Pflanzen mit Sporensuspensionen von *Bacillus subtilis* hat sich die Applikation direkt durch Gießen auf das Substrat bereits bewährt, weil dadurch eine optimale Bewurzelung der Pflanzen zu erreichen ist (PLIETZSCH 1996). Da *Bacillus subtilis* resistente Dauersporen bildet, war es unbedingt wichtig, die im Wasser aufgelösten Sporensuspensionen einer Wärmebehandlung bei 60 °C zu unterziehen, um die Sporen zur Keimung anzuregen bzw. zu aktivieren.

Für die zu prüfenden Laktobazillen wurde am 15.05.03 unter sterilen Bedingungen im Labor ein Vitalitätstest durchgeführt. Zunächst wurde die Konzentration der Originalprobe nach kurzem Schütteln mit destilliertem Wasser bzw. Puffer reduziert, so dass vier Konzentrationen bereitgestellt worden waren: Konzentrationen von 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} und 10^{-4} .

Nach der Homogenisierung der Proben und dem Anlegen einer dezimalen Verdünnungsreihe wurden auf die Standard-I-Agarplatten im Oberflächenspatel-Verfahren mit Hilfe des Drigolski Spatels das jeweilige Agar-Nährmedium aufplattiert. Die beimpften Platten wurden anschließend im Brutschrank inkubiert.

Die Gesamtkeimzahl der Proben wurde nach diesem Oberflächenkulturverfahren bzw. Tropfverfahren auf Standard-I-Agar bei 25 °C nach 4-5 Tagen Bebrütung ermittelt. Die Prüfung der Vitalität von *Lactobacillus* wurde nach der Bebrütung bestätigt, dabei konnten ca. 50 ausgewachsene Kolonien im reduzierten Konzentrat 10^{-4} ausgezählt werden. Nach der Vitalitätsprüfung von Laktobazillen kamen sie dann zum Einsatz.

Im Unterschied zu den *B. subtilis*- Sporensuspensionen war für die zu testenden *Lactobacillus* und Nährsubstrat eine Wärmebehandlung nicht nötig. Hier reicht es jeweils 50 ml von der Flüssigkeit mit einem Liter Leitungswasser zu vermischen. Die daraus entstehende homogene

Lösung ist dann einsatzbereit. Die Kontrolle wurde in analoger Weise nur mit Leitungswasser behandelt.

Bei den Untersuchungen zu Einzel- und Kombinationswirkungen von Bakterien und dem Nährsubstrat auf das Pflanzenwachstum war es wichtig, zwischen zwei Applikationsterminen zu unterscheiden. Zunächst waren zum ersten Termin sofortige Behandlungen und dann die Behandlungen nach 2 Wochen als zweiter Termin geplant. Die sofortigen Behandlungen umfassten:

Erstens die Einzelapplikation (a1: erste Behandlung) wie z. B. die Behandlung mit *Bacillus subtilis*, die Behandlung mit *Lactobacillus* und

Zweitens die kombinierte Applikation (a3: dritte Behandlung) wie z. B. Behandlung von *Bacillus subtilis* mit dem Nährsubstrat und die Behandlung von *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat. Als unbehandelte Kontrolle dienten eine Wasserbehandlung und eine Behandlung mit dem Nährsubstrat.

Währenddessen beschränkte sich die Einzelapplikation nach 2 Wochen (a2: zweite Behandlung) nur auf die Behandlung mit *Bacillus subtilis* und die Behandlung mit *Lactobacillus*. Eine Wasserbehandlung diente als unbehandelte Kontrolle.

Alle hier erwähnten Behandlungen wurden nach einem Monat nochmals und zeitgleich wiederholt, jedoch ohne Rücksichtnahme auf die zeitlichen Differenzen.

Die Bezeichnung b1 bezog sich auf *Bacillus subtilis*, während sich b2 auf das *Lactobacillus* bezog. Einen Überblick über die Behandlungsvarianten vermittelt die Abb. (3).

Im folgenden Text drückt die Bezeichnung C den Faktor des Substrats aus, wobei das Ziegelbruchsubstrat als C1, die Geotextilmatten als C2, die Mineralwollmatten als C3 und für die Mischung aus Ziegelbruchsubstrat mit Kompost als C4 benannt werden.

In unseren Feldversuchen war die Versuchsfläche in drei gleichgroße Blöcke geteilt, auf denen sich jeweils die Parzellen befanden. Es wurden drei Wiederholungen je Variante angelegt. Der Einfluss der Applikation von Bakterien und Nährsubstrat auf das Pflanzenwachstum wurde anschließend durch die Ermittlung von Boniturdaten festgestellt.

Ziegelbruchsubstrat
(C1)

Geotextilmatten
(C2)

Mineralwollmatten
(C3)

a3b2c1	a3b1c1	<div>K1c3</div> <div>a1b2c3</div> <div>a1b1c3</div>
K2c1	a1b2c2	
a3b1c1	a2b2c2	
a2b2c1	K1c2	
a1b1c1	a3b2c2	
a2b1c1	a2b1c2	
K1c1	K2c2	
a1b2c1	a1b1c2	

Abb. 3: Räumliche Anordnung des Versuches (2003)

K1: unbehandelte Kontrolle

K2: unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat

a1b1: sofortige Einzelbehandlung mit *Bacillus subtilis*

a1b2: sofortige Einzelbehandlung mit *Lactobacillus*

a2b1: nach 2 Wochen Einzelbehandlung mit *Bacillus subtilis*

a2b2: nach 2 Wochen Einzelbehandlung mit *Lactobacillus*

a3b1: sofortige Kombinationsbehandlung mit (*Bacillus subtilis* + Nährsubstrat)

a3b2: sofortige Kombinationsbehandlung mit (*Lactobacillus* + Nährsubstrat)

4.4.2. Bestimmung von Pflanzenwachstumsparametern

Anhand von Wachstumsparametern der Pflanzen wie, z. B. Sprosslängen, Sprossdurchmesser, Triebanzahl, Sprosshöhen, die Blütenanzahl, die Anzahl der Pflanzenausfälle, Wurzelanzahlen sowie Wurzellängen und der Bedeckungsgrad erfolgte die Effektivitätsprüfung der inokulierten Mikroorganismen. Zudem wurden jeweils 7 Pflanzen je Wiederholung gemessen.

Sprosslängen

Zur Ermittlung der Sprosslängen wurde die ganze gespannte Pflanze von der Sprossbasis bis zur Sprossspitze gemessen.

Sprossdurchmesser

Sprossdurchmesser wurden als Querabstand (Sprossprofil) zwischen Sprossbasis und Sprossende gemessen.

Sprosshöhen

Zur Bestimmung der Sprosshöhen wurde der oberirdische Abstand senkrecht zwischen der Sprossspitze und Substratoberfläche gemessen.

Triebanzahlen

Es wurde auch die Anzahl der gebildeten Seitentriebe je Pflanze gezählt.

Wurzelanzahlen und Wurzellängen

Ebenfalls wurden die Wurzeln gezählt bzw. deren Länge gemessen.

Die Blütenanzahlen und die Anzahl von Ausfällen bei Geotextilmatten wurden insgesamt durch Auszählen als Summe ermittelt.

Fotografische Dokumentation

Zur Erfassung des Bedeckungsgrades während des gesamten Versuchsverlaufes erfolgten fotografische Aufnahmen unter natürlichem Tageslicht. Diese wurde anschließend mit Hilfe des Computerprogramms (Sigma Scan Pro5) ausgewertet. Jede Parzelle wurde von oben 1,5 m senkrecht fotografiert. Als Hilfsmittel dazu diente ein Holzrahmen. Der Rahmen wurde 15 cm vom Rand angesetzt. Diese so festgelegte Stelle wurde jeweils fotografiert.

4.5. Statistische Auswertung

Die varianzanalytische Auswertung der Daten wurde mit dem Computer-Statistikprogramm SPSS für Windows (Version 10) durchgeführt. Die Messdaten wurden einfaktoriell und zweifaktoriell varianzanalytisch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verrechnet. Multiple Mittelwertvergleiche erfolgten nach dem Tukey-Test mit einem Signifikanzniveau von 5 %. Jeder Behandlungsvariante entsprachen drei Wiederholungen. Die signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten sind in den Tabellen durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

5. Untersuchungen zu Einzel- und Kombinationseffekten von Bakterien mit dem Nährsubstrat auf das Pflanzenwachstum (Freilandversuche)

5.1. Versuchsserie 1 (Praxisversuch München)

Für die Praxiserprobung wurde in München ein Streckenabschnitt in der Agnes-Bernauer Straße (Linie 19) zwischen Fröbelplatz und Fürstenrieder Straße gewählt. Das Umfeld dieser Teststrecke zeichnet sich durch enge Bebauung unterschiedlicher Gründungszeiten und Bauweisen aus, so dass eine große Bandbreite an Wachstumsbedingungen untersucht werden konnte. Die Fläche für die Anspritzverfahren von Sedumsprossen betrug 1100 m².

Der Versuch wurde am 15. September 2002 nebeneinander auf der Versuchsstrecke als Parzellenversuch angelegt. Die Parzellen wurden nummeriert (1 bis 24) und mit einer gelben Farbe markiert. Der Abstand zwischen den Parzellen betrug 3 m. Als Parzellengröße wurde 1,1 × 2 m gewählt, damit betrug die Fläche für jede Parzelle 2,2 m². Um die Parzellen erkennbar zu machen, wurden sie durch einen Fahrbahnanstrich an der Betonwange markiert.

5.1.1. Material und Methoden

Bei der Anspritznaturierung auf dem Ziegelbruchsubstrat kamen Sprosse verschiedener *Sedum*-Arten zur Anwendung (vgl. Tab. 5). Die Zusammensetzung der Anspritzmasse und die Auftragsmengen von *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* und dem Nährsubstrat waren gleich wie im (Abschnitt 4.2.) beschrieben.

Tab. 5: Aufwandmengen der verwendeten *Sedum*-Arten

<i>Sedum</i> -Arten	gesamt (kg)	g/m ²
<i>S. album</i>	95,2	86,54
<i>S. sexangulare</i>	95,2	86,54
<i>S. acre</i>	23,8	21,63
<i>S. reflexum</i>	11,9	10,81
<i>S. spurium</i>	11,9	10,81
gesamt	238	216,33

Der Aufbau einer Vegetationsschicht im Gleisbett war unterdessen wie folgt: Auf einer Ausgleichschicht aus dränfähigem Füllmaterial, das in den Wannenkörper eingebaut wurde, ist eine wurzelfeste Trennschicht (Folie) verlegt, auf der ca. 45 mm Extensivsubstrat eingebracht wurde. Das Vegetationssystem hat den folgenden Aufbau (Abb. 4).

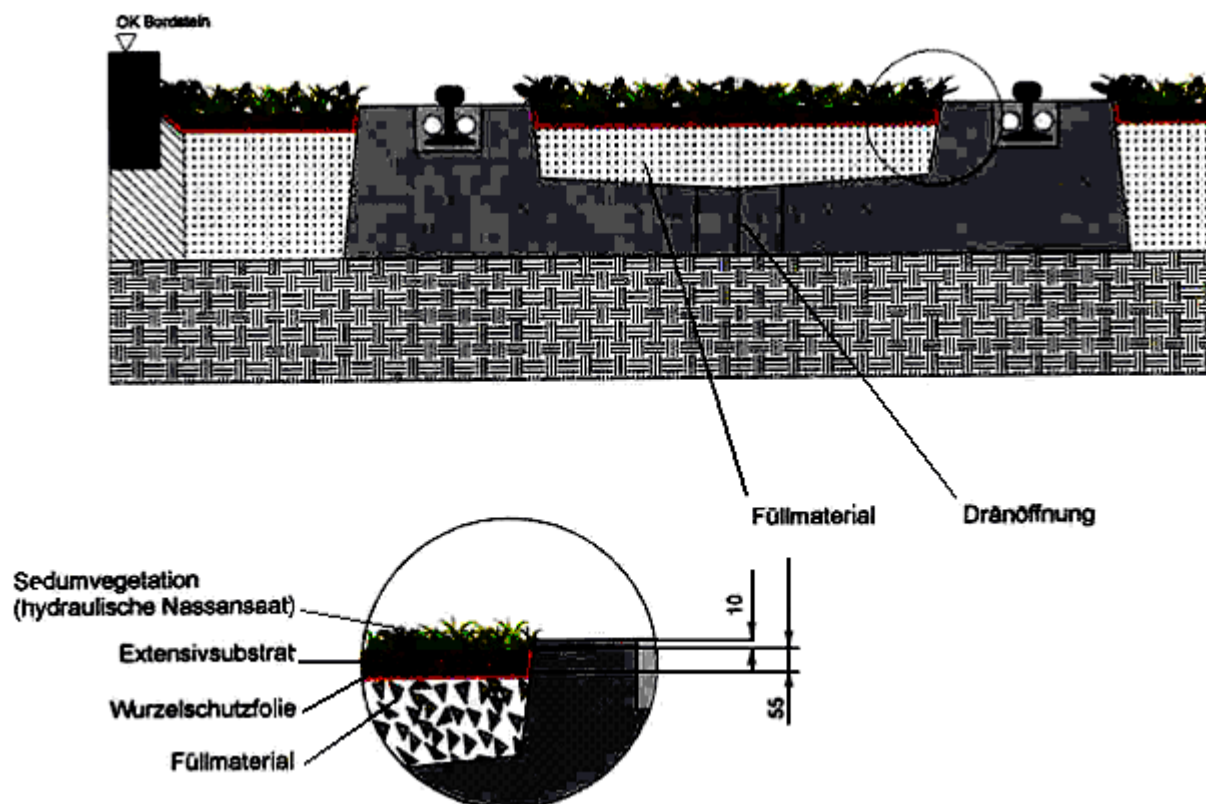


Abb. 4: System-Aufbau des Naturierungsverfahrens (SIEMSEN 2002)

Die Methodendurchführung war identisch mit den im (Abschnitt 4.4.) gegebenen Darstellungen. Der erste Applikationstermin von Bakterien und Nährsubstrat erfolgte am 15. September. Zur Aktivierung wurde das Sporengranulat von *Bacillus subtilis* im 60 °C warmen Wasser aufgelöst. Für *Lactobacillus* und das Nährsubstrat war das nicht nötig (vgl. Tab. 4). Die Kontrolle wurde nur mit Leitungswasser behandelt. Der zweite Applikationszeitpunkt fand 2 Wochen danach am 01. Oktober 02 statt.

Anschließend soll der Einfluss der Bakterienbehandlung auf die Vegetationsentwicklung in den jeweiligen Varianten durch die Ermittlung von Boniturdaten festgestellt werden. Jede Variante wurde in ihrer Biomassenentwicklung (Sprosslänge, Sprossdurchmesser, Triebanzahl, Wurzelanzahl und Wurzellänge) bonitiert. In der Tabelle (6) finden sich Auskünfte über die einzelnen Behandlungsvarianten. Diese schlossen 8 Varianten ein, davon waren 6 Kombinationen mit Bakterien und 2 Kontrollen.

Tab. 6: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten in München

Varianten	Applikationen	Anzahl der Wiederholungen	gemessene Pflanzen pro Wiederholung
K1c1	unbehandelte Kontrolle-Substrat 1	3	7
K2c1	unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat-C1	3	7
a1b1c1	sofortige Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> /C1	3	7
a1b2c1	sofortige Behandlung mit <i>Lactobacillus</i> /C1	3	7
a2b1c1	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C1	3	7
a2b2c1	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>Lactobac.</i> /C1	3	7
a3b1c1	sofortige Behandlung mit (<i>Bacillus subtilis</i> + Nährsubstrat) /C1	3	7
a3b2c1	sofortige Behandlung mit (<i>Lactobacillus</i> + Nährsubstrat) /C1	3	7

5.1.2. Ergebnisse und Diskussion

Die erste Bonitur erfolgte am 01.10.02. Zuvor wurde ein Quadratmeter als Maßstab eingemessen. Dann wurden 7 Pflanzen von jeder Parzelle entnommen und in Plastikbeutel eingetütet. Die Ermittlung der Pflanzenparameter wurde in Berlin durchgeführt. Zunächst wurde jede Pflanze unter der Wasserleitung gewaschen, um anhaftendes Substrat zu entfernen und nach einer kurzen Trocknung haben die Messarbeiten mit dem Lineal auf dem Tisch begonnen.

Die folgende Tabelle zeigt die durchschnittlichen Boniturergebnisse in Abhängigkeit von der Behandlung mit *B. subtilis* und *Lactobacillus*.

Tab. 7: Wachstumsbeeinflussungen durch eine einmalige Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* im Münchener Versuch

Varianten	Triebanzahl	Sprosslänge (cm)	Sprossdurchmesser (cm)	Wurzelsanzahl	Wurzellänge (mm)
K1c1	2,4 a	3,5 a	2,8 a	5,3 a	4,38 a
K2c1	3,4 ab	4 a	3 a	7,2 a	4,4 a
a1b1c1	3,3 ab	4,7 a	3,6 a	8,9 a	4,6 a
a1b2c1	5,4 b	3,9 a	3,1 a	7,9 a	4,55 a
a3b1c1	4,5 ab	4,2 a	3,6 a	9,6 a	4,7 a
a3b2c1	3,5 ab	4,3 a	3,6 a	8,8 a	4,4 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede in den Varianten im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$).

Triebanzahlen

Bei der Auswertung der Wachstumsparameter wurden positive Auswirkungen festgestellt. Besonders ist dies der Fall im Bezug auf die Anzahl der gebildeten Seitentriebe. Signifikante Unterschiede konnten ausschließlich bei der Einzelapplikation von *Lactobacillus* a1b2c1 gegenüber der unbehandelten Kontrolle K1c1 nachgewiesen werden. Selbst in der Variante a1b2c1 waren mehr Triebe zu verzeichnen: 3 gegenüber der unbehandelten Kontrollvariante K1c1, und 2 Triebe gegenüber der Einzelapplikation des Nährsubstrats K2c1 und der Behandlung mit *B. subtilis* a1b1c1. Im Unterschied zur Variante a1b2c1 waren weniger Triebe: 1 bei der Kombination von *B. subtilis* mit Nährsubstrat a3b1c1, und 2 in der Kombination a3b2c1 registriert.

Signifikante Unterschiede zwischen der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Behandlungsvarianten gab es jedoch nicht. Zwar im Vergleich mit der unbehandelten Kontrolle wurden positive Wirkungen auf die Triebanzahl durch die alleinige Anwendung des Nährsubstrats erzielt genau so, wie bei der Einzelapplikation von *Bacillus subtilis* a1b1c1. Der Einfluss der Kombination von *Bacillus subtilis* mit dem Nährsubstrat a3b1c1 sowie der

Kombination von *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat a3b2c1 war ebenfalls besser als die unbehandelte Kontrolle (vgl. Tab. 7).

Im Unterschied zu der Kontrolle wurden bei der Kombination a3b1c1 deutlich mehr Triebe gefunden (2 Triebe mehr als K1c1 und 1 Trieb mehr als bei K2c1). Währenddessen war es in der Kombination a3b2c1 nur 1 Trieb mehr als K1c1, aber gleich wie in der Variante K2c1

Sprosslängen

Bei Erfassung der mittleren Sprosslängen der Sedumvegetation wurden durch Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* und Nährsubstrat im Vergleich zu der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Kombinationsvarianten statistisch keine Unterschiede festgestellt.

Sprossdurchmesser

Es wurden ebenfalls bei den mittleren Sprossdurchmessern keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Die Wachstumsverbesserungen waren gering, so dass statistisch keine Unterschiede abzusichern waren.

Wurzelszahlen

Bei der Betrachtung der mittleren Wurzelszahlen der Sedumvegetation war der Einfluss von Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowohl bei der Einzelapplikation der Bakterien als auch bei der Kombination mit dem Nährsubstrat gering. Meist waren selbst scheinbare Wachstumsförderungen statistisch nicht abzusichern, was mit der Streuung der Werte zu begründen ist.

Wurzellängen

Es wurden weder signifikante Unterschiede, noch ein Einfluss auf die mittleren Wurzellängen der Sedumvegetation erzielt. Alle Behandlungsvarianten waren gleich.

Hinweis: Es wurden aus technischen Gründen bei dem Münchener Versuch keine Substratproben zum Nachweis der bakteriellen Aktivität im Labor entnommen.

5.2. Versuchsserie 2 (Komplexfeldversuch Berlin)

Die Freilandversuche zu Einzel- und Kombinationswirkungen von Bakterien und Nährsubstrat auf das Pflanzenwachstum wurden diesmal in Berlin weitergeführt. Dabei wurde auch die Wirkungsdauer von Bakterien in Abhängigkeit von der Substratart und Verweildauer im Substrat untersucht.

5.2.1. Untersuchungsmethodik Komplexfeldversuch Berlin

Die Anzucht einer Sedumvegetation im Gleisbett wurde mittels Nassansaat auf 2 verschiedenen Substratvarianten unterschiedlicher Schichtdicken und Bauweisen am Beispiel von Ziegelbruchsubstrat und von Geotextilmatten erprobt (vgl. Abb. 5, 6). Parallel dazu erfolgte unter den selben Freilandbedingungen eine Naturierung auf einer bereits vorkultivierten Mineralwollmatte (Abb. 7). Die Anspritzmassezusammensetzung, die eingebrachten Bakterien und das Nährsubstrat waren wie beim Praxisversuch gestaltet.

Beide Versuche unterschieden sich lediglich dadurch, dass erstens im München verschiedene *Sedum*-Arten, und in Berlin nur *Sedum album* zum Test kamen. Zweitens kamen noch Unterschiede anhand von Praxisbedingungen hinzu, obwohl prinzipiell in beiden Versuchen das gleiche Aufbausystem realisiert wurde.

In München kam es zu Versuchsbehinderungen im Straßenbereich. Daher war es erforderlich, den Versuch an einem sicheren Standort weiterzuführen. Der Versuch in Berlin hatte das folgende Aufbausystem, wie in der Tabelle (8) beschrieben.

Tab. 8: Darstellung des Aufbausystems

Bestandteile	Material
Untergrund	gewalzter Bodenuntergrund
Wurzelschutzbahn	0,4 mm Kunststoffbahn Folie / Mypex
Vegetationstragschicht (Extensivsubstrat)	Ziegelbruchsubstrat 50 l/m ²
Fläche	(Sedumvegetation)

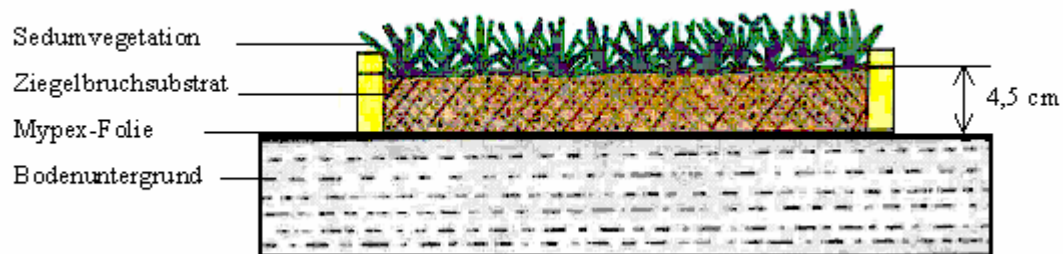


Abb. 5: Vegetationssystem des Ziegelbruchsubstrats (Querschnittsgestaltung)

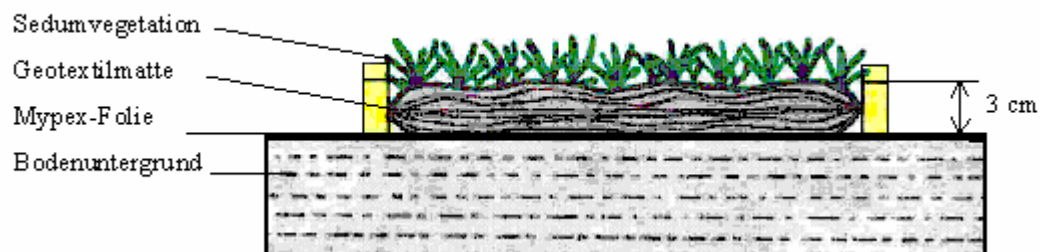


Abb. 6: Vegetationssystem der Geotextilmatten (Querschnittsgestaltung)

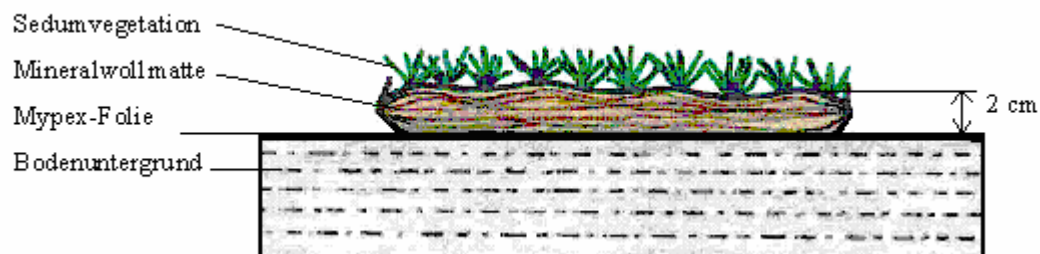


Abb. 7: Vegetationssystem der Mineralwollmatten (Querschnittsgestaltung)

Der Versuch wurde am 20.05.03 auf einer planierten Ackerfläche in 14195 Berlin-Dahlem, Thaerweg, angelegt (Abb. 8). Die Versuchsdurchführung und die Applikation von *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* und dem Nährsubstrat erfolgten methodisch in ähnlicher Weise wie im Praxisversuch. Die halbvorkultivierten Mineralwollmatten erhielten keine Anspritzmasse, da sie bereits bepflanzt waren. Hier wurde den Parzellen nur Mineraldünger zugegeben.

Es gab unterdessen zwei Applikationstermine: Der sofortige erste Applikationstermin von (Bakterien, Bakterien und Nährsubstrat) am 20. Mai 2003, und der zweite Applikationstermin von (Bakterien) 2 Wochen danach am 05.06.03.

Nach Ablauf von einem Monat nach dem Versuchsansatz wurden alle Behandlungen gleichzeitig nochmals am 20.06.03 wiederholt.

Es ist zu vermerken, dass bei den Mineralwollmatten auf die Anwendung von Nährsubstrat verzichtet wurde; ein zweiter Applikationstermin fand ebenfalls nicht statt.

Die einzelnen Behandlungsvarianten der Komplexversuche sind in der Tabelle (9) sichtbar. Diese umfassten 19 Varianten, davon waren 14 Kombinationen mit Bakterien und 5 Kontrollen.

Zur Prüfung der Effektivität der bakteriellen Behandlungen auf das Pflanzenwachstum in den jeweiligen Varianten wurden 4 Bonituren ausgeführt: Die erste im Juni drei Wochen nach Versuchsbeginn und zusätzlich wurde zwischenzeitlich eine Wurzelbonitur eine Woche nach dem Versuchsansatz durchgeführt. Es gab eine zweite Bonitur im Juli, eine dritte Bonitur im August und eine Abschlußbonitur im September. Dabei war die Vegetationsentwicklung nach den folgenden üblichen Boniturmerkmalen auszuwerten wie Bedeckungsgrad, Sprosslänge, Sprossdurchmesser, Anzahl der Seitentriebe, Sprosshöhen, Blütenanzahlen, Anzahl der Pflanzenausfälle, die Wurzelanzahl sowie die Wurzellängen.

Tab. 9: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten im Komplexversuch

Varianten	Applikationen	Anzahl der Wiederholungen	gemessene Pflanzen pro Wiederholung
K1c1	unbehandelte Kontrolle-Substrat 1	3	7
K1c2	unbehandelte Kontrolle-Substrat 2	3	7
K1c3	unbehandelte Kontrolle-Substrat 3	3	7
K2c1	unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat-C1	3	7
K2c2	unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat-C2	3	7
a1b1c1	sofortige Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C1	3	7
a1b1c2	sofortige Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C2	3	7
a1b1c3	sofortige Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C3	3	7
a1b2c1	sofortige Behandlung mit <i>Lactobacillus</i> /C1	3	7
a1b2c2	sofortige Behandlung mit <i>Lactobacillus</i> /C2	3	7
a1b2c3	sofortige Behandlung mit <i>Lactobacillus</i> /C3	3	7
a2b1c1	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C1	3	7
a2b1c2	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C2	3	7
a2b2c1	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>Lactobac.</i> /C1	3	7
a2b2c2	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>Lactobac.</i> /C2	3	7
a3b1c1	sofortige Behandlung mit (<i>Bacillus subtilis</i> + Nährsubstrat) / Substrat 1	3	7
a3b1c2	sofortige Behandlung mit (<i>Bacillus subtilis</i> + Nährsubstrat) / Substrat 2	3	7
a3b2c1	sofortige Behandlung mit (<i>Lactobacillus</i> + Nährsubstrat) / Substrat 1	3	7
a3b2c2	sofortige Behandlung mit (<i>Lactobacillus</i> + Nährsubstrat) / Substrat 2	3	7



Abb. 8: Versuchsanlage im Mai 2003

5.2.2. Ergebnisse und Diskussion

Die erste Bonitur der Wachstumsparameter Triebanzahl, Sprosslänge, Sprossdurchmesser, Sprosshöhe sowie der Bedeckungsgrad wurde drei Wochen nach Versuchsbeginn (am 10. Juni 03) durchgeführt. Zuvor wurden auch eine Woche nach der Versuchsanlage (am 26. Mai 03) die Wurzelanzahlen und Wurzellängen bonitiert.

Die Durchschnittswerte in Abhängigkeit von der Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* sind in der Tabelle (10) dargestellt.

Tab. 10: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat und Geotextilmatten, 1. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin

Substrate	Varianten	Triebanzahl	Sprosslänge (cm)	Sprossdurchmesser (cm)	Wurzelsanzahl	Wurzellänge (mm)
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	6,9 a	6,4 a	5,2 a	3,3 a	4,7 a
	K2c1	7,2 a	6,5 a	5,2 a	3,8 a	4,8 a
	a1b1c1	5,9 a	6,4 a	5,2 a	4,6 a	4,7 a
	a1b2c1	7,5 a	6,3 a	5,2 a	4,4 a	4,6 a
	a2b1c1	6,8 a	4,8 a	3,8 a	3,5 a	3,9 a
	a2b2c1	6,4 a	5,4 a	4,2 a	3,6 a	4,2 a
	a3b1c1	7,4 a	6,4 a	5,1 a	4,3 a	4,7 a
	a3b2c1	7,3 a	7,1 a	5,4 a	4,3 a	5,1 a
Geotextilmatten	K1c2	1,36 a	3,63 a	2,8 a	2,9 a	4,0 a
	K2c2	1,01 a	3,03 a	2,7 a	3,4 a	4,3 a
	a1b1c2	1,51 a	3,93 a	3,4 a	3,6 a	3,0 a
	a1b2c2	1,46 a	3,38 a	3,0 a	4,1 a	4,6 a
	a2b1c2	1,26 a	3,23 a	2,9 a	3,6 a	3,9 a
	a2b2c2	1,81 a	3,80 a	3,4 a	3,3 a	3,5 a
	a3b1c2	1,61 a	4,13 a	3,2 a	3,9 a	4,8 a
	a3b2c2	1,41 a	3,43 a	3,2 a	3,5 a	3,4 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Triebanzahlen

Es wurden bei der Ermittlung der Anzahl der Seitentriebe auf Ziegelbruchsubstrat an dem 1. Boniturzeitpunkt zwischen Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle keine signifikanten Unterschiede erzielt. Jedoch waren visuell positive Wirkungen bezogen auf die Behandlung mit Nährsubstrat (K2c1) und die Behandlungsvariante mit *Lactobacillus* (a1b2c1) sowie die dritte Behandlung in Bezug auf die Kombination *B. subtilis* mit Nährsubstrat (a3b1c1) sowie die Kombination Nährsubstrat mit *Lactobacillus* (a3b2c1) festzustellen.

Generell hat sich die Vegetation hinsichtlich der jeweiligen Varianten auf Ziegelbruchsubstrat besser entwickelt als auf Geotextilmatten. Währenddessen war die Entwicklung auf Geotextilmatten viel schlechter. Hier haben Behandlungen mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* sowie Nährsubstrat weder signifikante Unterschiede noch bakterielle Wirkungen erbracht. Alle Varianten waren gleich der unbehandelten Kontrolle.

Sprosslängen

Der Einfluss der Applikation von *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* und dem Nährsubstrat auf die Sprosslängen der Sedumvegetation ist in (Tab. 10) sichtbar. Dabei wurden auf Ziegelbruchsubstrat im Vergleich zu der unbehandelten Kontrolle (K1c1) keine statistisch gesicherten Unterschiede festgestellt.

Auf Geotextilmatten zeichneten sich für die Pflanzen bezüglich der Sprosslängen keine Unterschiede ab.

Sprossdurchmesser

Bei der Betrachtung der Sprossdurchmesser der Sedumvegetation und der Sprosslängen ergibt sich, dass beide Wachstumsparameter miteinander korrelieren. Signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle gab es nicht. Auf Geotextilmatten zeigten die Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* wieder nur gleiche Unterschiede .

Wurzelaufzahlen

Um Aussagen über die Bewurzelung treffen zu können, wurde die Anzahl der gebildeten Wurzeln jeder Pflanze durch Auszählen ermittelt.

Wie in der Tab. (10) dargestellt wurde, waren es bis zum 1. Boniturzeitpunkt am 26.05.03 (eine Woche nach dem Versuchsbeginn) sowohl auf Ziegelbruchsubstrat als auch auf Geotextilmatten statistisch kaum Unterschiede zwischen der Kontrollvariante und anderen Behandlungsvarianten zu bemerken. Allerdings wurde diese Wurzelbonitur kurz nach der Versuchsanlage durchgeführt, um soweit wie möglich eine Beschädigung der Wurzel bei der Entnahme von Pflanzen zu vermeiden.

Wurzellängen

Während die Wurzeln ausgezählt wurden, wurden auch zeitgleich die Wurzellängen gemessen. Dabei wurden auf Ziegelbruchsubstrat keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Genau so wurden auch bei der Erfassung von Wurzellängen auf Geotextilmatten keine Unterschiede festgestellt.

Sprosshöhen

Es erfolgte auf Mineralwollmatten keine signifikante Verbesserung des Wachstums durch Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* gegenüber der unbehandelten Kontrolle, wie in der Tabelle 11 gezeigt ist.

Tab. 11: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Mineralwollmatten, 1. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin

Substrat	Varianten	Sprosshöhe (cm)
Mineralwollmatten	K1c3	2 a
	a1b1c3	2,3 a
	a1b2c3	1,8 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Es wird zur Begründung der bisherigen Versuchsergebnisse davon ausgegangen, dass die Sprosse durch die hohe Temperatur bzw. die extreme Trockenperiode im Sommer 2003 und aufgrund der Methode Nassansaat nicht genügend Wurzelsystem entwickelt haben, um die bakteriellen Stoffwechsel-Produkte aus dem Rhizosphärenbereich der Pflanzenwurzeln aufnehmen zu können. Denkbar wäre, die kurze Zeitfrist unter dem Einfluss von hohen Temperaturen und somit auch starken Verdunstungsverlusten der Pflanzen bei beiden Substrattypen, insbesondere auf Geotextilmatten als mögliche Ursache für die nicht stattgefundenen signifikanten Wachstumsförderungen anzusehen. Infolgedessen bleiben die wachstumsstimulierenden Wirkungen der *Bacillus subtilis*-Applikation aus; nämlich die Wirkung der Stoffwechselprodukte und Antibiotika sowie Phytohormonderivate. Diese spielen die Hauptrolle bei der Wirkung der Bakterien (BOCHOW 1995, ZÜLLICH 1995).

Ein Einfluss des Applikationszeitpunktes der Bakterien auf das Pflanzenwachstum konnte nicht festgestellt werden. Bei einmaligen Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowie mit dem Nährsubstrat zeigten die Bakterien ebenfalls statistisch keine Unterschiede. Deshalb wird die Bakterienbehandlung noch einmal durchgeführt, um die bakterielle Aktivität verstärkt zeigen zu können. Die Entwicklung der Sedumvegetation war bisher auf Ziegelbruchsubstrat viel besser als auf Geotextilmatten und Mineralwollmatten. Das bedeutet, dass dieses Substrat ein für das Pflanzenwachstum günstigeres Substrat ist. Die schlechte Entwicklung der Vegetation auf Geotextilmatten ist offenbar durch ungünstige Umweltfaktoren (Trockenstress) und substratspezifische Faktoren ausgelöst worden.

Zweite Bonitur

Die zweite Bonitur wurde einen Monat nach der ersten Bonitur am 10.07.03 durchgeführt. Dabei wurden Triebanzahlen, Sprosslängen, Sprossdurchmesser, Sprosshöhen, die Blütenanzahlen und die Pflanzenausfälle auf Geotextilmatten und der Bedeckungsgrad erfasst.



Abb. 9: Entwicklungszustand der Sedumvegetation im Juli 2003

Tab. 12: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat und Geotextilmatten, 2. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin

Substrate	Varianten	Triebanzahl	Sprosslänge (cm)	Sprossdurchmesser (cm)	Blütenanzahl	Anzahl der Pflanzenausfälle
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	7,6 a	6,2 a	5,5 a	11 a	
	K2c1	11,3 b	9 c	8,4 bc	15,3 a	
	a1b1c1	10,5 ab	7 abc	6,5 ab	17,3 a	
	a1b2c1	10,6 ab	8,5 bc	7,4 abc	11 a	
	a2b1c1	10,4 ab	7,5 abc	6,8 abc	19 a	
	a2b2c1	9,4 ab	6,4 ab	5,8 a	11 a	
	a3b1c1	11,7 b	9,1 c	8,7 c	10 a	
	a3b2c1	11,4 b	9 c	8,1 bc	15,6 a	
Geotextilmatten	K1c2	3,1 a	4,1 a	3,1 a	3,3 ab	11 a
	K2c2	3,4 a	3,5 a	2,5 a	1,3 a	5,3 a
	a1b1c2	5,2 a	4,4 a	3,3 a	3,3 ab	7,0 a
	a1b2c2	3,8 a	4,2 a	3,2 a	8,3 b	7,0 a
	a2b1c2	4,6 a	3,7 a	3,3 a	1,6 a	4,3 a
	a2b2c2	3,7 a	4,3 a	2,9 a	4,6 ab	6,6 a
	a3b1c2	4,1 a	4,6 a	3,2 a	6,6 ab	9,6 a
	a3b2c2	5,4 a	3,9 a	3,2 a	2,3 ab	4,3 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Es wurden die mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowie Nährsubstrat behandelten Varianten zur Kontrolle verglichen. Die mittleren Wachstumsparameter sind in der Tabelle (12) dargestellt.

Triebanzahlen

Bezüglich der Anzahl der Triebe konnten auf Ziegelbruchsubstrat sichtbare Unterschiede festgestellt werden. So wurden im Vergleich zur Kontrolle K1c1 mehr Triebe ermittelt, insbesondere wird dies bei der kombinierten Applikation von Bakterien mit dem Nährsubstrat (a3b1c1, a3b2c1) und der alleinigen Anwendung des Nährsubstrates K2c1 deutlich. Die Unterschiede betrugen bis zu mehr als 4 Triebe.

Die Unterschiede zwischen Kontrolle K1c1 und den Varianten der einzelnen Behandlungen mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* betrugen 3 Triebe mehr als die Kontrolle K1c1 z. B. die Varianten (a1b1c1, a1b2c1). Unterschiede zwischen diesen beiden Varianten gab es nicht.

Betrachtet man die Varianten der einzelnen Behandlung mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* nach 2 Wochen (a2b1c1, a2b2c1), so sind auch hier mehr Triebe (ca. 2 bei der Behandlung mit *Lactobacillus* a2b2c1 bis 3 bei der Behandlung mit *B. subtilis* a2b1c1) als bei der Kontrolle K1c1 festzustellen.

Jedoch wurden bei der Erfassung der Triebanzahlen auf Geotextilmatten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrolle K1c2 und anderen Varianten registriert. Die Anzahl der Triebe variierte sehr stark, so dass die Standardabweichung in manchen Fällen höher als der Mittelwert war. Deshalb ist der Mittelwert für einen Vergleich nicht zuverlässig (GORBATSCHEVSKAJA 2003).

Sprosslängen

Bei der Ermittlung der Sprosslängen traten auf Ziegelbruchsubstrat signifikante Unterschiede auf. Besonders war sichtbar, dass durch die kombiniert Behandlung von Bakterien mit dem Nährsubstrat deutliche Unterschiede erzielt wurden. So wurde im Vergleich der Variante K1c1 zu Varianten der Kombinationsbehandlungen (a3b1c1, a3b2c1) eine größere Länge von bis zu 3 cm festgestellt eben so, wie bei der Einzelapplikation des Nährsubstrates K2c1. Das macht klar, dass sowohl *B. subtilis* als auch *Lactobacillus* unter Zugabe von Nährsubstrat als Bodenhilfsmittel die Länge von Sprossen gefördert haben.

Die erzielte Sprosslänge war aber geringer in Varianten der einzelnen Bakterienbehandlung. So wurden hier nur 1 bis 2 cm mehr für die Länge in den Varianten (a1b1c1, a1b2c1) als bei der Kontrolle K1c1 festgestellt. Während die Kombinationswirkungen von Bakterien mit dem

Nährsubstrat am besten, gefolgt von den Varianten der ersten Einzel-Bakterienbehandlungen waren, haben die Bakterienbehandlungen nach 2 Wochen (Varianten a2b1c1, a2b2c1) kaum Unterschiede mit Ausnahme der Variante a2b1c1, ca. 1 cm mehr als K1c1, erbracht.

Im Unterschied zum Ziegelbruchsubstrat wurden auf Geotextilmatten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrollvariante K1c2 und den anderen Behandlungsvarianten bzw. den Kombinationen von *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat erzielt.

Sprossdurchmesser

Im Bezug auf den Sprossdurchmesser der *Sedum*-Pflanzen wurden signifikante Unterschiede zwischen den Varianten auf Ziegelbruchsubstrat festgestellt. Im Vergleich mit der Kontrolle K1c1 hatten die Varianten der nur mit dem Nährsubstrat und die Kombinationsbehandlungen, die mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* behandelt worden waren, deutliche Unterschiede von ca. 3 cm und mehr als die Kontrolle gebracht (vgl. a3b1c1, a3b2c1 und die Variante K2c1).

Sichtbare Unterschiede sind auch bei den Varianten der ersten einzelnen Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* (a1b1c1, a1b2c1) festgestellt worden. Verglichen mit der Kontrolle K1c1 sind hier 1 bis 2 cm mehr als bei K1c1 registriert worden. Der Unterschied zwischen Varianten der Kombinationsbehandlung mit Bakterien und Nährsubstrat (a3b1c1, a3b2c1) und der ersten Einzel-Bakterienapplikation von *B. subtilis* und *Lactobacillus* betrug bis zu 2 cm weniger in der Variante (a1b1c1). Jedoch der Unterschied in der ersten Einzel-Behandlung mit *Lactobacillus* a1b2c1 ist 1 cm größer als die *B. subtilis*- Applikation a1b1c1.

Die Unterschiede zwischen der Kontrolle K1c1 und den Varianten der Behandlung nach 2 Wochen sind nicht gravierend (1 cm mehr in Variante a2b1c1 als K1c1 und der Applikation von *Lactobacillus* a2b2c1). Es wurden wiederum auf den Geotextilmatten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Sprossdurchmesser der Sedumpflanzen festgestellt.

Blütenanzahlen

Auf Ziegelbruchsubstrat waren die Unterschiede zwischen der Kontrollvariante K1c1 und den übrigen Varianten statistisch nicht signifikant. Trotzdem wurden hier sichtbare Unterschiede gefunden. Das Nährsubstrat hat auch die Blütenanzahl positiv beeinflusst und zwar wurden 4

Blüten in der Variante K2c1 mehr als bei der Kontrolle K1c1 gezählt. Gleichermäßen war es bei der kombinierten Behandlung mit Bakterien und Nährsubstrat (a3b2c1 mit *Lactobacillus*) offensichtlich mehr Blüten mit Ausnahme der Kombination mit *B. subtilis* a3b1c1, hier wurden weniger Blüten registriert als bei der Kontrolle K1c1.

Während in der Einzelbehandlung mit *B. subtilis* a1b1c1 etwa 6 Blüten mehr als bei K1c1 festgestellt wurden, gab es jedoch keine Unterschiede zwischen K1c1 und der einzelnen Applikation von *Lactobacillus* a1b2c1. Die größte Anzahl an Blüten wurde in der Behandlung mit *B. subtilis* a2b1c1 nach 2 Wochen gefunden. Gleich der Kontrolle K1c1 lagen die Werte in der Variante a2b2c1.

Da die Anzahl der gebildeten Blüten durch Behandlungen mit *B. subtilis*, die Applikation des Nährsubstrats sowie dessen Kombination mit *Lactobacillus* größer war als in der Kontrolle, könnte das als erstes Indiz auf eine verbesserte Gestaltung bedeuten.

Bemerkenswert ist, dass das Nährsubstrat auf Geotextilmatten im Gegensatz zum Ziegelbruchsubstrat die Blütenanzahl nicht besonders beeinflusst hat. Dazu sind in den Varianten K2c2, a3b2c2 weniger Blüten als in der Kontrolle K1c2 festgestellt worden. Mit Ausnahme der Kombination mit *B. subtilis* a3b1c2 wurden hier ca. 3 Blüten mehr als bei der Kontrolle K1c2 registriert. Sichtbare Unterschiede waren durch die sofortige Einzelbehandlung mit *Lactobacillus* a1b2c2 mit 5 Blüten mehr als bei der Kontrollvariante K1c2 festzustellen. Jedoch die Behandlung mit *B. subtilis* a1b1c2 unterschied sich nicht von der Kontrolle K1c2. Betrachtet man die Blütenanzahlen bei der Einzelbehandlung mit Bakterien nach 2 Wochen, so waren hier im Vergleich mit der Kontrolle K1c2 weniger Blüten durch die Behandlung mit *B. subtilis* a2b1c2 vorhanden. Jedoch wurden in der mit *Lactobacillus* a2b2c2 behandelten Variante mehr Blüten als in K1c2 ermittelt.

Pflanzenausfälle

Trotz der extremen Wetterlage (im Sommer 2003 war es überdurchschnittlich warm und trocken) waren auf dem Ziegelbruchsubstrat keine Pflanzenausfälle festgestellt worden. Dagegen war die Anzahl der Pflanzenausfälle durch Stress bzw. extreme Standortbedingungen bei den Geotextilmatten deutlich größer. Einen signifikanten Unterschied zwischen Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle gab es nicht. Die größte Anzahl an Ausfällen war bei der Kontrolle K1c2 festgestellt worden. Geringer dagegen war die Anzahl

der Ausfälle, bis zu 6 tote Pflanzen, in der Variante K2c2 unter Zugabe von Nährsubstrat, gefolgt von den Varianten der kombinierten Behandlung von Bakterien mit Nährsubstrat. So betrug der Unterschied mit bis zu 7 Pflanzen weniger bei der Variante a3b2c2 als bei der Kontrolle K1c2, d.h. dass das Nährsubstrat sowohl allein als auch gemeinsam mit *Lactobacillus* offenbar das Leben der Pflanzen gesichert haben muss (vgl. K2c2, a3b2c2). Geringer war die Leistung des Nährsubstrats in der Kombination mit *B. subtilis* a3b1c2.

Ebenfalls war die Anzahl der Ausfälle bei der einzelnen Bakterienapplikation kleiner als die bei der Kontrolle K1c2 d.h., die Behandlungen mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* bringen den Pflanzen bessere Überlebenschancen, da der Anteil toter Pflanzen erheblich reduziert wird.

Genau so hat auch die einzelne Behandlung mit Bakterien nach 2 Wochen das Leben der Pflanzen positiv beeinflusst, so waren hier am wenigsten Ausfälle registriert worden.

Deshalb könnte man vermuten, dass die Behandlung mit *Bacillus subtilis* sowie *Lactobacillus* und das Nährsubstrat eine deutliche Wirkung, bezogen auf den Stressabbau, hat. Dies würde auch die höheren Ausfälle der unbehandelten Kontrolle begründen. Mit diesem Ergebnis werden nun die bereits erwähnten Aussagen von JACOB & PLIETZSCH und SCHULZE (1991), GLÜCK (1993), ECKFELDT (1997) bestätigt.

Sprosshöhen

Auf Mineralwollmatten wurden zum zweiten Boniturzeitpunkt statistisch keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrollvariante K1c3 und Behandlungen mit *B. subtilis* a1b1c3 und *Lactobacillus* a1b2c3 bezüglich der Sprosshöhen festgestellt.

Tab. 13: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Mineralwollmatten, 2. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin

Substrat	Varianten	Sprosshöhe (cm)	Blütenanzahl
Mineralwollmatten	K1c3	2,1 a	1,3 a
	a1b1c3	2,6 a	2 a
	a1b2c3	1,8 a	2 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Blütenanzahlen

Bezogen auf die Blütenanzahlen waren ebenfalls die Unterschiede auf Mineralwollmatten zwischen der unbehandelten Kontrolle K1c3 und den Behandlungen mit *Bacillus subtilis* a1b1c3 und *Lactobacillus* a1b2c3 an dem zweiten Boniturtermin nicht signifikant.

Dritte Bonitur

Die dritte Bonitur wurde einen Monat nach der zweiten Bonitur am 10.08.03 durchgeführt.

Dabei wurden Sprosshöhen und Blütenanzahlen auf Ziegelbruchsubstrat,

Triebanzahlen, Sprosslängen und Sprossdurchmesser auf Geotextilmatten, sowie die

Sprosshöhen auf Mineralwollmatten und der Bedeckungsgrad erfasst.

Tab.14: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat und Mineralwollmatten,

3. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin

Substrate	Varianten	Sprosshöhe (cm)	Blütenanzahl
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	4,9 a	11,6 a
	K2c1	8,9 c	30,3 a
	a1b1c1	6,9 abc	25 a
	a1b2c1	6,2 ab	14 a
	a2b1c1	7,3 bc	22,6 a
	a2b2c1	5,7 ab	10,3 a
	a3b1c1	7,6 bc	12,3 a
	a3b2c1	9 c	20 a
Mineralwollmatten	K1c3	3,7 a	
	a1b1c3	3,3 a	
	a1b2c3	3,1 a	

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Es wurde ein Vergleich der Behandlung mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowie Nährsubstrat zu der Kontrolle durchgeführt. Die mittleren Wachstumsparameter sind in der Tabelle 14 dargestellt.

Sprosshöhen

Bei der Erfassung von den Sprosshöhen der Sedumvegetation waren auf dem Ziegelbruchsubstrat klar signifikante Unterschiede zu verzeichnen. Während sich bis zu 5 cm Sprosshöhen in der Kontrolle K1c1 ergaben, wurden infolge der Introduktion vom Nährsubstrat sowohl allein appliziert in K2c1 als auch in Kombination mit Bakterien (dritte Behandlung) 4 cm mehr ermittelt (vgl. K2c1, a3b1c1, a3b2c1) als in der Kontrolle K1c1. Es bestanden jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Einzelapplikationen von Nährsubstrat und diesen Kombinationsvarianten mit Bakterien. Signifikante Unterschiede waren ausschließlich zwischen K2c1 und K1c1, K2c1 und der Einzelapplikation von *Lactobacillus* (a1b2c1, a2b2c1), a3b1c1 und K1c1 sowie a3b2c1 und K1c1 zu bemerken.

Betrachtet man die Varianten der ersten Behandlung mit *B. subtilis* und *Lactobacillus*, so sind hier weniger Unterschiede (durchschnittlich 2 bis 3 cm hoch) im Unterschied zu den Varianten der dritten Behandlung und der Kontrolle mit Nährsubstrat registriert worden. Dennoch waren es hier bis zu 2 cm Sprosshöhe mehr als in der unbehandelten Kontrolle K1c1.

Die Differenzen zwischen den Varianten der nach 2 Wochen Bakterienbehandlung sind gering. Die Variante a2b1c1 unterschied sich signifikant von der Kontrollvariante K1c1. Fast wurde durch Behandlung mit *B. subtilis* a2b1c1 (1,5 cm Höhe durchschnittlich) mehr als die Behandlung mit *Lactobacillus* a2b2c1 erzielt. Gesicherte Unterschiede zwischen beiden Behandlungsvarianten nach 2 Wochen gab es nicht.

Verglichen mit Varianten der kombinierten Applikation von Bakterien mit dem Nährsubstrat (dritte Behandlung) und der Kontrolle mit Nährsubstrat K2c1, waren es in den Varianten nach 2 Wochen (zweite Behandlung) ca. 2-3 cm Höhe weniger. Jedoch war der Unterschied zu der unbehandelten Kontrolle K1c1 (0,8 bis zu ca. 2,5 cm) größer in den Behandlungen mit *Lactobacillus* und *B. subtilis* (a2b2c1, a2b1c1). Gesicherte Unterschiede zwischen beiden Behandlungsvarianten gab es nicht.

Im Unterschied zum Ziegelbruchsubstrat wurden im Vergleich mit der unbehandelten Kontrolle K1c3 durch die Behandlungen mit *Bacillus subtilis* a1b1c3 und *Lactobacillus* a1b2c3 auf Mineralwollmatten keine signifikanten Unterschiede erzielt.

Blütenanzahlen

Bei Betrachtung der Blütenanzahl wurden auf Geotextilmatten in der dritten Bonitur keine Blüten festgestellt, weil alle Pflanzen, die zuvor im Juli geblüht hatten, im August 03 angesichts der Trockenperiode und der damit auch extrem hohen Temperaturen abgestorben waren. Währenddessen haben Sedumpflanzen nur auf Ziegelbruchsubstrat weitere Blüten gebildet. Dennoch konnten durch Auszählen der Blüten zwischen der unbehandelten Kontrolle K1c1 und den übrigen Behandlungsvarianten keine statistisch gesicherten Unterschiede nachgewiesen werden. Die höchste Blütenanzahl wurde ausschließlich bei der Behandlung mit Nährsubstrat erreicht (K2c1). Diese wurde gefolgt von den Varianten der ersten und der zweiten Behandlung mit *Bacillus subtilis* (a1b1c1, a2b1c1) und dem Kombinationseffekt von *Lactobacillus* mit Nährsubstrat bei der dritten Behandlung gegenüber der unbehandelten Kontrolle K1c1.

Jedoch haben zum Boniturzeitpunkt Kombinationen von *B. subtilis* mit Nährsubstrat a3b1c1 und die Einzelapplikation von *Lactobacillus* sowohl bei der ersten Behandlung als auch bei der zweiten Behandlung nach 2 Wochen (a1b2c1, a2b2c1) die geringsten Werte, bezogen auf die Blütenanzahl erbracht. Dabei werden mit diesen Ergebnissen Aussagen von ZHANG et al. (1995) und MURPHY et al. (2003) bestätigt. Bei Geotextilmatten wurden an diesem Termin auch die in der folgenden Tab. (15) genannten Boniturmerkmale ermittelt.

Tab. 15: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Geotextilmatten, 3. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin

Substrat	Varianten	Triebanzahl	Sprosslänge (cm)	Sprossdurchmesser (cm)
Geotextilmatten	K1c2	8,5 a	5,6 a	4,6 a
	K2c2	7,8 a	5 a	4,5 a
	a1b1c2	8,8 a	5,9 a	5,2 a
	a1b2c2	8,7 a	5,7 a	4,8 a
	a2b1c2	8,3 a	5,2 a	4,7 a
	a2b2c2	9,4 a	5,8 a	5,2 a
	a3b1c2	9 a	6,1 a	5 a
	a3b2c2	8,6 a	5,4 a	5 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Triebanzahlen

Es konnten im Bezug auf die Triebanzahlen zwischen der unbehandelten Kontrolle K1c2 und den Behandlungsvarianten mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowie dem Nährsubstrat sowohl bei der Einzelapplikation, wie auch bei der Kombination von Bakterien mit Nährsubstrat keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Sprosslängen

Durch Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* und Nährsubstrat allein appliziert und in Kombination mit einander wurden hinsichtlich der mittleren Sprosslängen der Sedumvegetation auf Geotextilmatten keine statistisch gesicherten Unterschiede erzielt.

Sprossdurchmesser

Es wurden weder bei der Applikation von *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* noch Nährsubstrat bezüglich mittlerer Sprossdurchmesser der Pflanzen signifikante Unterschiede gefunden. Alle Behandlungsvarianten waren statistisch gleich der unbehandelten Kontrollvariante (K1c2).

Bedeckungsgrad

Die folgende Tabelle vermittelt Relativwerte im Prozent zum Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus*. Die Erfassung des Bedeckungsgrades ergibt sich aus der Tabelle (16).

Ziegelbruchsubstrat

Zunächst zeichneten sich zum ersten Boniturtermin im Juni zwischen der unbehandelten Kontrolle und den Behandlungsvarianten auf Ziegelbruchsubstrat keine statistisch gesicherten Unterschiede ab. Erst danach waren im Juli die deutlichsten Unterschiede zu verzeichnen. Demzufolge war es klar, inwiefern die Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* allein und in Kombination mit dem Nährsubstrat die Entwicklung des Bedeckungsgrades mit Sedumvegetation im Vergleich zu der unbehandelten Kontrolle K1c1 beeinflussen konnten.

Tab. 16: Relativwerte (in %) zum Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Mineralwollmatten (Komplexfeldversuch Berlin)

Substrate	Varianten	Juni	Juli	August	September
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	17,46 a	78,83 a	97 a	98 a
	K2c1	24,53 a	97,61 b	100 a	100 a
	a1b1c1	13,55 a	90,16 ab	100 a	100 a
	a1b2c1	23,09 a	96,22 b	98,63 a	99,58 a
	a2b1c1	19,3 a	89,37 ab	97,44 a	98,22 a
	a2b2c1	18,23 a	91,36 ab	97,8 a	99,73 a
	a3b1c1	26,87 a	98,76 b	100 a	100 a
	a3b2c1	24,3 a	99 b	100 a	100 a
Geotextilmatten	K1c2	2,88 a	4,9 a	26,72 a	44,02 a
	K2c2	2,8 a	3,23 a	22,92 a	41,76 a
	a1b1c2	2,71 a	6,36 a	29,01 a	47,69 a
	a1b2c2	3,29 a	6,28 a	27,59 a	45,12 a
	a2b1c2	3,37 a	4,46 a	25,88 a	45,48 a
	a2b2c2	2,7 a	4,16 a	23,34 a	38,32 a
	a3b1c2	3,59 a	6,01 a	30,57 a	48,21 a
	a3b2c2	3,21 a	4,76 a	32,52 a	51,65 a
Mineralwollmatten	K1c3	16,54 a	48,27 a	72,99 a	92,68 a
	a1b1c3	28,64 a	59,05 a	72,08 a	83,4 a
	a1b2c3	16,09 a	33,5 a	53,55 a	72,18 a

* Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Ein signifikanter Unterschied konnte nach der alleinigen Zugabe von Nährsubstrat erzielt werden (Var. K2c1). Bei alleiniger Anwendung von *Bacillus subtilis* sowohl in der ersten sofortigen Applikation (Var. a1b1c1), wie auch nach fünfzehn Tagen (Var. a2b1c1) ergab sich kein signifikanter Unterschied im Vergleich mit der unbehandelten Kontrolle (K1c1). Jedoch hat sich dadurch die Vegetationsentwicklung deutlicher verbessert als bei der unbehandelten Kontrolle.

Betrachtet man die mit *Lactobacillus* behandelten Varianten, so ergibt sich daraus ein signifikanter Unterschied bezüglich der ersten Behandlung (Var. a1b2c1). Demgegenüber hatte die Applikation von *Lactobacillus* erst nach zwei Wochen (Var. a2b2c1) eine geringere Wirkung auf den Bedeckungsgrad erbracht. Im Vergleich mit der bereits erwähnten ersten Sofortbehandlung war aber der Einfluss größer als bei der unbehandelten Kontrolle (K1c1).

Eine erhebliche Wachstumsförderung zeigten die Bakterien nach der Kombination mit dem Nährsubstrat. Allerdings wurden hier sowohl bei kombinierter Anwendung mit *Bacillus subtilis* (Var. a3b1c1), wie auch bei der Kombination von *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat (Var. 3b2c1) statistisch gesicherte Unterschiede gegenüber der unbehandelten Kontrolle K1c1 festgestellt. Zwischen den beiden Kombinationen konnten hinsichtlich der jeweiligen Behandlungsvarianten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

Während im Juli ca. 7 Wochen nach der Versuchsanlage ein fast 100%iger Bedeckungsgrad ausschließlich durch die Behandlung mit *Lactobacillus* (Var. a1b2c1), die alleinige Anwendung von Nährsubstrat (Var. K2c1) sowie dessen Kombinationen mit *Bacillus subtilis* (Var. a3b1c1) und mit *Lactobacillus* (Var. a3b2c1) erreicht wurde, schwankte er zwischen 75 und 80 % in der unbehandelten Kontrolle K1c1.

Deshalb zeigen die bisherigen Ergebnisse ein vergleichbares Bild, wie LUNG (2000) bei seinem Versuch mit Rasen festgestellt hatte. Nach dessen Aussagen betrug der Bedeckungsgrad nach sechs Wochen bei den mit *B. subtilis* behandelten Parzellen 100 %. Dabei wurden auch unter ungünstigen Bedingungen eine schnellere Bestandsentwicklung und eine erhöhte Trockenresistenz gegenüber der unbehandelten Kontrollparzellen wahrgenommen.

Im Unterschied zu den Boniturergebnissen im Juli, gab es jedoch bei dem dritten und vierten Boniturtermin (August, September) statistisch keine Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle. Der Bedeckungsgrad lag zu diesem Zeitpunkt fast in allen Varianten bei 100 %.

Geotextilmatten

Auf Geotextilmatten wurden während des gesamten Versuchsverlaufs von Mai bis September zwischen der unbehandelten Kontrolle und den Behandlungsvarianten keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Alle Varianten waren statistisch gleich der Kontrolle. Es ist zu vermuten, dass die *B. subtilis*- Sporensuspension und *Lactobacillus* sowie das Nährsubstrat keine großen Effekte auf die Vegetationsentwicklung ausübten, da selbst die unbehandelte Kontrolle eine annähernd gleiche Wirkung wie die Behandlungsvarianten aufwies.

Mineralwollmatten

Zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle zeigten sich auf Mineralwollmatten weder bei *Bacillus subtilis* noch bei *Lactobacillus* signifikante Unterschiede bezüglich der Vegetationsentwicklung.

Unter Berücksichtigung der bisher ermittelten Daten, bezogen auf die höheren vegetativen Leistungen der mit den Nutzbakterien behandelten Pflanzen gegenüber der unbehandelten Kontrolle auf Ziegelbruchsubstrat ist hauptsächlich mit deren besseren Gesundheitszustand erklärbar. Dafür ist aber auch denkbar, als Ursache die unmittelbar wachstumsfördernde Wirkung durch *Bacillus subtilis*- Stoffwechselprodukte, die den Hormonhaushalt der Pflanze beeinflussen, zu benennen. Die hier tendenziell deutlichen Wachstumsverbesserungen aller oberirdischen Pflanzenteile wird ebenfalls durch andere Ergebnisse bestätigt, die in Quarzsand durchgeführt wurden (ZIMMER 2003). Er fand bei seinen Untersuchungen mit Erbsen heraus, dass die Behandlungen von Substrat und Saatgut mit *Bacillus subtilis* bessere Ergebnisse gegenüber der unbehandelten Kontrolle erbrachten.

Sofern von einer Vergleichbarkeit des Quarzsands mit dem Ziegelbruchsubstrat ausgegangen werden kann, wäre die bessere Durchlüftung des Ziegelbruchsubstrats und damit die allgemein besseren Entwicklungsbedingungen für das aerobe Nutzbakterium *Bacillus subtilis* gegenüber Geotextilmatten und Mineralwollmatten als Ursache zu nennen. Daneben kommen auch der geringe Nährstoffgehalt beim Ziegelbruchsubstrat und damit die stärkere Bindung von *Bacillus subtilis* an die Pflanzenwurzel sowie die geringere mikrobielle Konkurrenz anderer Mikroorganismen und somit die höhere Aktivität der Bakterien als entscheidende

Ursache zur Begründung der Verbesserung des Pflanzenwachstums beim Ziegelbruchsubstrat im Vergleich zu den übrigen Substrattypen in Frage.



Abb. 10: Entwicklungszustand der Sedumvegetation zum Versuchsabschluss im September 2003

5.2.3. Nachweis der Wirksamkeit der inokulierten *Bacillus subtilis*- und *Lactobacillus*-Stämme auf das Pflanzenwachstum

Um nachzuweisen, ob die bereits applizierten Bakterien (Versuchsserie 2) aktiv waren, wurden sie auf ihren Einfluss auf das Pflanzenwachstum überprüft. Es kamen je nach Substratart die folgenden 2 Testverfahren zur Anwendung:

- ❖ Gefäßtest mit Keimpflanzen für Ziegelbruchsubstrat bzw. Ziegelkompostsubstrat
- ❖ Röhrchentest für Geotextilmatten und Mineralwollmatten

5.2.3.1. Gefäßtest mit Keimpflanzen

Material und Methoden

Am 08.07.03. wurden 8 Proben vom Prüfsubstrat (Ziegelbruchsubstrat) des Feldversuchs entnommen, die anschließend in Gläser gefüllt worden waren. Jede Substratprobe entsprach einer Behandlungsvariante. Als Mischkomponente und Vergleichsubstrat diente Einheitserde Typ 0 (EE0). Die Einheitserde Typ 0 bewährte sich als Kultursubstrat. Als Pflanzenmaterial stand die Erbse *Pisum sativum* L. zur Verfügung. Folgende Geräte fanden Verwendung:

- Kunststoff-Mischwanne,
- Kunststofftöpfe (300 ml) mit Bodenlochung und Unterschalen,
- wasserlöslicher Mehrnährstoffdünger Wopil (2 g/l)
- zertifiziertes Saatgut von Erbse, Keimfähigkeit > 90 %,
- Laborwaage (10 mg ablesbar)

Einzelheiten über die Ausführung des Testverfahrens sind im Methodenbuch (1994) enthalten.

Der Ansatz des Pflanzenversuches erfolgte nach Eingang der frischen Substratprobe (08.07.03). Aus Prüfsubstrat und EE0 werden Prüfmischungen mit 50 % Prüfsubstratanteil hergestellt. Für die Variante mit 50 % Prüfsubstrat wurden jeweils 300 ml Prüfsubstrat mit

300 ml EE0 gemischt. Danach werden jeweils Prüfmischungen in die entsprechenden Gefäße gefüllt. Als Versuchsgefäße dienten Plastikbecher, die mit 200 ml Substrat befüllt wurden.

Zur Absicherung als dreifacher Versuchsansatz wurden je Prüfmischung (Variante) 3 Gefäße befüllt. Ebenso wurden vom Vergleichssubstrat (EE0 unvermischt) drei Versuchsgefäße gefüllt. Der Inhalt aller Töpfe wurde bei der Befüllung durch 3-faches Aufstoßen der Gefäße leicht komprimiert.

Auf der Substratoberfläche wurden je Gefäß 10 vorgekeimten Erbsensamen gleichmäßig verteilt. Durch Sichtkontrolle ist sicherzustellen, dass keine Bruch- oder Kümmerkörner zur Aussaat gelangen. Die gut angedrückte Abdeckungsschicht wurde abschließend mit ca. 60 ml Wasser gleichmäßig befeuchtet. Eine Vernässung der Abdeckschicht muss vermieden werden, da sonst die Keimung der Erbsen gehemmt sein kann. Die Aufstellung der Gefäße erfolgte in einem klimatisierten Raum bei

Temperatur: 20 °C am Tag 18 °C in der Nacht

Luftfeuchte: 60 % (tags) 70 % (nachts)

Beleuchtungsstärke: 10 klx

Dauer: 12 Tage

Im Versuchszeitraum von 12 Tagen wurden die Gefäße mit entsalztem Wasser gegossen. Das Gießen erfolgte nach Pflanzenbedarf, ein starker Aufwuchs verbraucht mehr Wasser als ein schwacher Aufwuchs. Das Substrat ist ständig gut feucht zu halten, ohne das Sickerwasser austritt. Tritt dennoch Sickerwasser in die Unterschalen aus, ist dieses zurückzuführen. Der Schnitt der Versuchspflanzen erfolgt, wenn in der Kontrolle (Vergleichssubstrat) die Mehrzahl der zweiten Blätter die ersten überwachsen hat. Die Sprosse werden mit einer Schere direkt über der Substratoberfläche abgeschnitten und sofort gewogen (in [g]).

Ergebnisse und Diskussion

Nach 12 Tagen in der Klimakammer wurde eine Bonitur zu Bestimmung der Aktivität von Bakterien am 20.07.03 durchgeführt. Die bakterielle Wirksamkeit war indirekt anhand von Wachstumsparametern der Pflanzen im Verhältnis zu der Einheitserdekontrolle (EE0) zu ermitteln.

Erfasst wurden folgende Parameter:

1. Sprosslänge
2. Frischmasse von Spross und Wurzel

Die Relativwerte der Boniturergebnisse in Abhängigkeit von den applizierten *B. subtilis* und *Lactobacillus* bei Ziegelbruchsubstrat werden in der Tab. (17) angegeben.

Tab. 17: Relativwerte für Sprosslängen sowie Spross- und Wurzelfrischmassen im Keimtest mit Erbsen

Substrate	Varianten	% Sprosslänge	% Sprossfrischmasse	% Wurzelfrischmasse
Einheitserdekontrolle	EE0	100 % bc	100 % bc	100 % bc
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	129 c	130,9 c	108,1 c
	K2c1	103,2 bc	117,5 bc	79,5 bc
	a1b1c1	97,6 bc	110,8 bc	79,5 bc
	a1b2c1	67,5 abc	75,2 abc	39,3 abc
	a2b1c1	54,3 ab	50 ab	31,9 ab
	a2b2c1	94,3 bc	115,9 bc	69,6 bc
	a3b1c1	34,5 ab	39,6 ab	17,2 ab
	a3b2c1	4,9 a	4,6 a	2,4 a

* Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Sprosslängen

Im Bezug auf die Sprosslänge der Erbsenpflanze konnten keine positiven Bioeffekte zwischen der unbehandelten Kontrollvarianten (K1c1, der Einheitserdekontrolle EE0, der Kontrolle mit Nährsubstrat K2c1) und den Behandlungsvarianten beim Ziegelbruchsubstrat erzielt werden. Die Tatsache spiegelte sich auch bei der Ermittlung des vegetativen Wachstums der Pflanzen wider. Die unbehandelte Kontrolle (K1c1) erwies sich bestens hinsichtlich der Sprosslänge. Ein signifikanter Unterschied konnte bei der unbehandelten Kontrolle K1c1 gegenüber der zweiten Behandlung mit *Bacillus subtilis* a2b1c1, der Kombination von *Bacillus subtilis* mit Nährsubstrat a3b1c1 sowie der Kombination von *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat a3b2c1 nachgewiesen werden.

Zwischen der unbehandelten Kontrolle K1c1 und der Einheitserdekontrolle EE0 sowie der Kontrolle mit Nährsubstrat K2c1, der ersten Behandlung mit *B. subtilis* a1b1c1, der zweiten Behandlung nach 2 Wochen mit *Lactobacillus* a2b2c1 gab es jedoch statistisch keine signifikanten Unterschiede.

Es war bei der Einheitserdekontrolle EE0 im Vergleich zu der unbehandelten Kontrolle K1c1 ein geringer Einfluss zu beobachten. Ebenfalls zeigte das Nährsubstrat K2c1 die gleiche Wirkung, wie bei der Einheitserdekontrolle EE0.

Die Einheitserdekontrolle EE0 unterschied sich stark von der Kombination von Nährsubstrat mit *Lactobacillus* a3b2c1 genau so wie bei der Kontrolle mit Nährsubstrat.

In Gegensatz zu dem Freilandversuch war der Effekt der Einzelapplikation von *Bacillus subtilis* sowohl bei der ersten Behandlung (a1b1c1) als auch der zweiten Behandlung (a2b1c1) besser als die kombinierte Applikation von *Bacillus subtilis* mit dem Nährsubstrat (a3b1c1), aber schlechter als die unbehandelte Kontrolle. *Lactobacillus* hat genau so, wie *Bacillus subtilis*, bei der Einzelapplikation (a1b2c1, a2b2c1) eine bessere Wirkung als die Kombination mit Nährsubstrat (a3b2c1) erbracht. Jedoch war es schlechter gegenüber der unbehandelten Kontrolle (K1c1).

Sprossfrischmassen

Die Ergebnisse bei der Ermittlung der Sprossfrischmasse waren identisch zu denen bei der Sprosslänge. Es wurden weder signifikante Unterschiede noch ein Einfluss auf die relative Sprossfrischmasse festgestellt.

Die Einzelapplikationen von *Bacillus subtilis* a1b1c1, a2b1c1 waren besser als die Kombination mit dem Nährsubstrat a3b1c1. Ebenfalls zeigte auch *Lactobacillus* eine bessere Wirkung, wenn die Bakterien allein appliziert wurden gegenüber einer kombinierten Applikation von *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat a3b2c1. Die besten Ergebnisse waren wiederum bei der unbehandelten Kontrollvariante zu verzeichnen.

Wurzelfrischmassen

Die Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* allein und in Kombination mit dem Nährsubstrat hatten keine positiven Wachstumsbeeinflussungen erbracht, da selbst die

unbehandelten Kontrollvarianten demgegenüber besser waren. Im Unterschied zu den Behandlungsvarianten waren die unbehandelten Kontrollvarianten am besten. Die alleinige Anwendung des Nährsubstrates war besser als die Kombination mit Bakterien.

Es wurden weder signifikante Unterschiede hinsichtlich der Wachstumsverbesserung noch Bioeffekte auf das Wurzelwachstum der Pflanzen festgestellt.

5.2.3.2. Röhrchentest

Bei Geotextilmatten und Mineralwollmatten wurde der Röhrchentest angewandt (Methode nach HENTSCHEL 1985). Die Methode bringt den Vorteil, möglichst die ganze Pflanze einschließlich Wurzel beobachten zu können. Im Unterschied zu dem Gefäßtest gab es keine Einheitserde Typ 0 (EE0) bzw. Mischkomponenten.

Material und Methoden

Bereits am 08.07.03 erfolgte die Probennahme von Prüfsubstraten. Dabei wurden 8 Proben von Geotextilmatten und 3 bei Mineralwollmatten mit einem scharfen Messer geschnitten und danach in Gläser- getrennt je nach Behandlungsvariante- gefüllt.

Im Labor wurden die Proben anschließend mit Wasser gesättigt und dann 5 Stunden auf dem Schüttler stehen lassen (150 U/min). Nach dem Schütteln wurden die Gläser bei 8 °C in den Kühlschrank gestellt. Es wurden jeweils 250 ml Extrakt mit 50 ml Wasser vermischt. Die Extrakt-Lösung wurde gleichmäßig auf die Röhrchen verteilt, jeweils 25 ml pro Röhrchen. Aus dieser Mischlösung wurden insgesamt 10 Röhrchen pro Behandlungsvariante vorbereitet und beschriftet. Die Abdeckung der Röhrchen erfolge mit dünnem Nylon. Um die vorgekeimten Erbsenpflanzen sicher in den entsprechenden Röhrchen, einzeln aufsetzen zu können, war es erforderlich, die sog. Abdeckung mit Nadeln zu löchern. Jeder Behandlungsvariante entsprachen 10 Röhrchen. Anschließend wurden alle Röhrchen für 12 Tage in der Klimakammer aufgestellt. Die klimatischen Verhältnissen in der Klimakammer waren gleich, wie beim Keimpflanzenversuch in Gefäßen.

Die Bewertung der Effektivität von *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* im Prüfsubstrat erfolgte anhand der Sprosslängen sowie des Gewichtes von Spross- und Wurzelfrischmassen. Die Ergebnisse werden prozentual in Relation zur Frischmasse der unbehandelten Kontrolle

(K1c2) ausgedrückt. Die Effektivitätsprüfung der Bakterien war indirekt über den Einfluss der Bakterien auf das Pflanzenwachstum zu bestimmen.

Ergebnisse und Diskussion

Zur Ermittlung von Sprosslängen, Sprossfrischmassen sowie Wurzelfrischmassen erfolgte eine Bonitur am 20.07.03. Die Relativwerte der Boniturergebnisse in Abhängigkeit von der Behandlung mit *B. subtilis*, *Lactobacillus* sowie Nährsubstrat bei Geotextilmatten und Mineralwollmatten sind in (Tab. 18) gezeigt.

Tab. 18: Relativwerte für Sprosslängen sowie Spross- und Wurzelfrischmassen im Röhrchentest mit Erbsen

Substrate	Varianten	% Sprosslänge	% Sprossfrisch- masse	% Wurzelfrisch- masse
Kontrolle	K1c2	100 % a	100 % a	100 % a
Geotextilmatten	K2c2	100,4 a	102,4 a	104,4 a
	a1b1c2	101,5 a	90,2 a	91,1 a
	a1b2c2	109 a	106 a	111,1 a
	a2b1c2	100,2 a	100 a	86,6 a
	a2b2c2	105,9 a	101,2 a	111,1 a
	a3b1c2	109,4 a	108,5 a	104,4 a
	a3b2c2	100 a	97,5 a	97,7 a
Mineralwollmatten	a1b1c3	107,4 a	103,6 a	115,2 a
	a1b2c3	107,4 a	106 a	97,8 a

* Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Sprosslängen

Durch Erfassung von Relativwerten der Sprosslänge der Erbse konnten bei den Geotextilmatten zwischen der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Behandlungsvarianten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Scheinbar war es eine Wachstumsförderung, die sich statistisch nicht feststellen ließ. Diese bezieht sich ausschließlich auf die Einzel-Applikation von *Lactobacillus* (a1b2c2, a2b2c2) und die Kombination von *Bacillus subtilis* mit Nährsubstrat (a3b1c2).

Bei den Mineralwollmatten waren auch zwischen den Behandlungsvarianten statistisch keine Unterschiede nachweisbar, die Wachstumsbeeinflussung war geringfügig.

Sprossfrischmassen

Beim Vergleich der bakteriellen Wirkungen auf die Sprossfrischmassen wurden zwischen der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Behandlungsvarianten statisch keine Unterschiede gefunden. Gleiche Wirkungen zeigten sich ebenfalls auch bei Mineralwollmatten beim Vergleich von Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* mit der Kontrolle.

Wurzelfrischmassen

Bei der Ermittlung der Relativwerte von Wurzelfrischmassen zeigten sich zwischen der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Behandlungsvariante bei Geotextilmatten keine Unterschiede.

Genau so waren auch durch Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* bei Mineralwollmatten keine besonderen wachstumsstimulierende Effekte im Extrakt zu verzeichnen.

Bewertung der Testergebnisse

Der Nachweistest von (Versuchsserie 2) wurde an der Erbse durchgeführt. Es scheint dabei keine Verbindung zwischen den Feldergebnissen und denen im Nachweisverfahren zu bestehen, da die Aktivität der Bakterien von Pflanzenart und Bodentyp abhängig ist JAHN (1998) und BOCHOW et al. (2001). Die Erbse erwies sich beim Ziegelbruchsubstrat im Gegensatz zu der Sedumvegetation als sehr empfindlich. Das deckt sich mit der hohen Anzahl an Ausfällen sowie Verpilzungen bzw. Kümmerlingen bei dieser Pflanze.

Sehr erstaunlich war, dass die Boniturergebnisse denen im Feldversuch entgegengesetzt waren. Positive Bioeffekte bei der Behandlungsvarianten konnten nicht festgestellt werden. Während die Applikation von Nährsubstrat (K2c1) und die Kombination von Nährsubstrat mit *Bacillus subtilis* (a3b1c1) sowie die Kombination von *Lactobacillus* mit Nährsubstrat (a3b2c1) im Feldversuch bestens waren, waren sie jedoch im Biotest schlecht. Die Einheitserdekontrolle EE0 und die unbehandelte Kontrolle waren viel besser als die Behandlung mit den Bakterien. Anhand der durchgeführten Testverfahren ergibt sich als Resultat Folgendes:

Gefäßtest

1. Die Erbse zeigte im Biotest eine hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Ziegelbruchsubstrat (HENTSCHEL 2003).
 2. Der Gesundheitszustand der Pflanzen war bei der unbehandelten Kontrolle bestens.
 3. Der Gesundheitszustand der Pflanzen war bei der Kombination von Bakterien mit Nährsubstrat deutlich schlechter.
 4. Die Einzelapplikation von Nährsubstrat war besser als deren Kombination mit den Bakterien.
 5. *B. subtilis* allein appliziert war besser als die Kombination mit dem Nährsubstrat.
 6. *Lactobacillus* allein appliziert war auch besser als die Kombination mit Nährsubstrat.
 7. Es konnten keine wachstumsstimulierenden Wirkungen nachgewiesen werden.
 8. Das Ziegelbruchsubstrat war biologisch schlecht zu bewerten.
 9. Das Ziegelbruchsubstrat war als Pflanzeerde für die Erbse nicht geeignet und sollte deshalb nicht untersucht werden.
 10. Die Sedumvegetation war im Feldversuch im Gegensatz zur Erbse resistent und konnte die schlechten substratspezifischen Faktoren tolerieren.
 11. Der Vergleich von der Erbse mit der Sedumvegetation ist nicht relevant.
 12. Die Ergebnisse im Feldversuch stimmten nicht mit denen im Testverfahren überein.
- Es ist zu vermuten, dass die Laktobakterien aufgrund ihrer hohen Ansprüche an Nährstoffen und Feuchtigkeit damit den Pflanzen die Lebensgrundlagen entziehen.

Röhrchentest

1. Der Röhrchen Test ist nicht immer ausreichend.
2. Es konnten im Substrat- Extrakt keine wachstumsstimulierenden Stoffe gefunden werden.
3. Es wurden im Extrakt weder signifikante Unterschiede noch Wachstumsverbesserungen erzielt.
4. Der Extrakt war sehr arm an Nährstoffen, denn die Bakterien waren nur temporär für bestimmte Zeit wirksam. Sie waren nicht für lange Zeit aktiv (HENTSCHEL 2003).

5.3. Versuchsserie 3 (Herbst / Winter)

Angesichts der extrem trocknen Witterungslage im Laufe des Sommers 2003 wurde der Versuch diesmal in den kalten Winterfeuchtperioden fortgesetzt. Dabei wurde neben Einzel- und Kombinationswirkungen von Bakterien und Nährsubstrat auf das Pflanzenwachstum auch die Wirkungsdauer von Bakterien in Abhängigkeit von der Substratart untersucht.

5.3.1. Versuchsanlage

Die Erprobung eines Naturierungsverfahrens auf dem nährstoffarmen Gleisbett wurde mittels Nassansaat auf 3 verschiedenen Substratvarianten unterschiedlicher Schichtdicken und Bauweisen am Beispiel von Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompostsubstrat geprüft. Es wurde diesmal jedoch anstelle von Mineralwollmatten eine Mischung aus Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil (etwa 5 l/m²) verwendet.

Bei dem verwendeten Kompost (Profi-Substrat) handelt es sich um ein Gemisch aus wenig bis mäßig und stark zersetztem Hochmoortorf, welches mit sorptionsstarkem Ton angereichert ist. Das Substrat enthält die für das Pflanzenwachstum erforderlichen Haupt- und Spurennährstoffe. Währenddessen wurden *B. subtilis*, *Lactobacillus* und das Nährsubstrat auf ihren Einfluss auf das Wachstum von *Sedum album* getestet. Die so genannten Anspritzmasse und Auftragsmengen waren mit dem Komplexversuch identisch.

Die Anlage des Versuchs erfolgte am 25.09.03 auf dem Acker in Berlin-Dahlem. Die angewandte Methodik entsprach jener aus dem Komplexversuch. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, waren auch die Versuchsbedingungen dieselben.

Jedoch im Unterschied zum Komplexfeldversuch (Versuchsserie 2) beschränkte sich der erste Applikationstermin nur auf die sofortige Kombinationsbehandlung von Bakterien und Nährsubstrat (a3: dritte Behandlung), währenddessen wurde der zweite Termin nach 2 Wochen (a2: zweite Behandlung) gewählt und war auf die einzelnen Bakterienapplikationen begrenzt.

Die kombinierte Sofortbehandlung mit Bakterien und Nährsubstrat wurde am 06. 10. 03 durchgeführt. Die zweite Bakterienbehandlung erfolgte nach 2 Wochen am 20.10.03. Eine zweite Wiederholung erfolgte am 03.11.03. Die Variantenaufteilung ist in Tab. 19 angegeben.

Tab. 19: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten in Versuchsserie 3
(Herbst / Winter)

Varianten	Applikationen	Anzahl der Wiederholungen	Pflanzen je Wiederholung
K1c1	unbehandelte Kontrolle-C1	3	7
K1c2	unbehandelte Kontrolle-C2	3	7
K2c1	unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat-C1	3	7
K2c2	unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat-C2	3	7
K2c4	unbehandelte Kontrolle + Nährsubstrat-C4	3	7
K3c4	unbehandelte Kontrolle -C4	3	7
a2b1c1	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C1	3	7
a2b1c2	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C2	3	7
a2b1c4	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> /C4	3	7
a2b2c1	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>Lactobac.</i> /C1	3	7
a2b2c2	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>Lactobac.</i> /C2	3	7
a2b2c4	nach 2 Wochen Behandlung mit <i>Lactobac.</i> /C4	3	7
a3b1c1	sofortige Behandlung mit (<i>Bacillus subtilis</i> + Nährsubstrat) /C1	3	7
a3b1c2	sofortige Behandlung mit (<i>Bacillus subtilis</i> + Nährsubstrat) /C2	3	7
a3b1c4	sofortige Behandlung mit (<i>Bacillus subtilis</i> + Nährsubstrat) /C4	3	7
a3b2c1	sofortige Behandlung mit (<i>Lactobacillus</i> + Nährsubstrat) /C1	3	7
a3b2c2	sofortige Behandlung mit (<i>Lactobacillus</i> + Nährsubstrat) /C2	3	7
a3b2c4	sofortige Behandlung mit (<i>Lactobacillus</i> + Nährsubstrat) /C4	3	7

Es wurden anschließend Daten über den Bedeckungsgrad, Sprosslängen und die Anzahl der gebildeten Seitentriebe durch die Bonitur erfasst.

5.3.2. Ergebnisse und Diskussion

Zur Ermittlung von Bedeckungsgrad, Sprosslängen und Anzahl der gebildeten Seitentriebe wurde eine Bonitur vier Wochen nach Versuchsbeginn am 23.10.03 durchgeführt. Eine weitere Bonitur erfolgte ein Monat danach. Die Abschlussbonitur vom Bedeckungsgrad erfolgte im Juni 2004. Die Boniturwerte sind als Mittelwerte in Abhängigkeit von der Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* in der Tabelle 20 dargestellt.

Tab. 20: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompostsubstrat, 1. Bonitur in Versuchsserie 3 (Herbst / Winter)

Substrate	Varianten	Triebanzahl	Sprosslänge (cm)
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	1,57 a	4,07 a
	K2c1	2,07 a	4,17 a
	a2b1c1	2,13 a	4,21 a
	a2b2c1	1,71 a	4,15 a
	a3b1c1	2,09 a	4,21 a
	a3b2c1	2,13 a	4,26 a
Geotextilmatten	K1c2	1,94 a	4,13 a
	K2c2	2,09 a	4,11 a
	a2b1c2	1,80 a	4,12 a
	a2b2c2	1,90 a	4,19 a
	a3b1c2	2,04 a	4,22 a
	a3b2c2	2,04 a	4,14 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K3c4	2,04 a	4,20 a
	K2c4	2,28 a	4,23 a
	a2b1c4	2,04 a	4,19 a
	a2b2c4	1,85 a	4,20 a
	a3b1c4	2,32 a	4,35 a
	a3b2c4	2,42 a	4,31 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Triebanzahlen

Es wurden auf Ziegelbruchsubstrat zum Boniturzeitpunkt sowohl durch Behandlungen mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* als auch mit dem Nährsubstrat bei Einzel- und kombinierter Applikation hinsichtlich der Triebanzahlen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle festgestellt. Ebenfalls war das auch der Fall auf Geotextilmatten. Bei der mittleren Triebanzahl zeigten sich zwischen der Kontrolle und den übrigen Behandlungen auf dem Ziegelkompostsubstrat wieder keine Unterschiede. Eine klare Wirkung von Wachstumsförderung durch die Applikation von Bakterien und Nährsubstrat ließ sich jedoch nicht finden. Meist waren es scheinbar deutliche Wachstumsförderungen, die sich statistisch nicht absichern ließen.

Sprosslängen

Auch zu diesem 1. Boniturzeitpunkt wurde der Einfluss der Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* sowie Nährsubstrat auf die Vegetationsleistung geprüft. Dabei konnten durch Erfassung der mittleren Sprosslänge der Sedumvegetation bei allen Substrattypen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

Meist waren es visuelle Unterschiede, die statistisch nicht abzusichern waren, was mit der großen Streuung der Werte zu begründen ist. Aus bisherigen Boniturergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass *Bacillus subtilis* ebenso wie *Lactobacillus* nach einer einmaligen Applikation keine erheblichen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum ausübten. Da bis zu diesem 1. Boniturzeitpunkt (im Gegensatz zu dem Sommersversuch) nur niedrige Feldtemperaturen herrschten, blieb deshalb die Vegetationsentwicklung deutlich unbeeinflusst. Fehlende optimale Entwicklungsbedingungen können also das Wachstum der Kulturpflanzen beschränken. Außerdem können die Pflanzen aufgrund des Nassansaatverfahrens bisher nicht genügend Wurzelsystem gebildet haben und dabei bleiben *Bacillus subtilis*-Stoffwechselprodukte im Rhizosphärenbereich der Pflanze nicht verfügbar. Denn ein stärkeres Wurzelwerk führt letztlich zu einer verbesserten Aufnahme von Wasser und Nährstoffen und damit zu schnellerem Wachstum und größerer Stresstoleranz (KILIAN et al. 2000).

Denkbar wäre als Ursache auch, dass die Aktivität der Bakterien in Bezug auf Prozesse der Vermehrung und der Stoffwechselbildung, die den Hormonhaushalt der Pflanze beeinflussen, bei niedrigen Temperaturen ausbleiben.

Zweite Bonitur

Die zweite Bonitur von Wachstumsparametern erfolgte am 24.11.03. Dabei wurden Triebanzahlen, Sprosslängen und die Bedeckungsgrade erfasst. Vergleiche der Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* zu der unbehandelten Kontrolle sind in der folgenden Tabelle 21 aufgeführt.

Tab. 21: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompostsubstrat, 2. Bonitur in Versuchsserie 3 (Herbst / Winter)

Substrate	Varianten	Triebanzahl	Sprosslänge (cm)
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	2,33 a	4,23 a
	K2c1	3,17 b	4,69 ab
	a2b1c1	2,94 ab	4,50 ab
	a2b2c1	2,90 ab	4,62 ab
	a3b1c1	3,99 b	4,86 b
	a3b2c1	3,95 b	4,71 ab
Geotextilmatten	K1c2	2,47 a	4,32 a
	K2c2	2,88 a	4,31 a
	a2b1c2	2,71 a	4,32 a
	a2b2c2	2,76 a	4,42 a
	a3b1c2	2,90 a	4,42 a
	a3b2c2	2,75 a	4,33 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K3c4	3,42 a	5,12 a
	K2c4	4,75 b	5,11 a
	a2b1c4	3,90 ab	5,00 a
	a2b2c4	3,56 a	5,09 a
	a3b1c4	4,28 ab	5,21 a
	a3b2c4	4,47 ab	5,07 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Triebanzahlen

Bei der zweiten Bonitur konnten hinsichtlich mittlerer Triebanzahlen der Sedumvegetation die ersten signifikanten Unterschiede lediglich bei der alleinigen Anwendung des Nährsubstrats (K2c1) und der kombinierten Applikation von *Bacillus subtilis* mit Nährsubstrat (a3b1c1) sowie der Kombination von *Lactobacillus* mit Nährsubstrat (a3b2c1) gegenüber der unbehandelten Kontrolle (K1c1) festgestellt werden. Unterschiede zwischen der Einzel-Applikation beider Bakterien und der unbehandelten Kontrolle auf Ziegelbruchsubstrat gab es jedoch nicht.

Betrachtet man die Vegetationsentwicklung auf Geotextilmatten, so waren hier zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle statistisch kaum Unterschiede sichtbar. Eine erhebliche Verbesserung der mittleren gebildeten Seitentriebe erfolgte an diesem 2. Boniturzeitpunkt nicht.

Verglichen mit den ersten und zweiten Substrattypen wurde nach einer 10%igen Kompostzugabe eine verbesserte Wachstumsbeeinflussung gegenüber der unbehandelten Kontrolle erzielt. Ein signifikanter Unterschied wurde ausschließlich bei der alleinigen Anwendung des Nährsubstrats festgestellt. Zwischen den übrigen Behandlungsvarianten und der Kontrolle waren sowohl bei der Einzelapplikation der Bakterien als auch bei der Kombination mit Nährsubstrat statistisch keine Unterschiede zu verzeichnen

Sprosslängen

Bei der Ermittlung mittlerer Sprosslängen der Sedumvegetation auf Ziegelbruchsubstrat zeigte sich ausschließlich ein signifikanter Unterschied durch die kombinierte Applikation von *Bacillus subtilis* und Nährsubstrat (a3b1c1). Die Wachstumsförderungen waren zum 2. Boniturtermin geringfügig. Gleiche Unterschiede waren zwischen den übrigen Behandlungsvarianten mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* und der unbehandelten Kontrolle zu beobachten.

Es wurden wiederum auf Geotextilmatten weder signifikante Unterschiede noch ein Einfluss auf die mittlere Sprosslänge festgestellt. Genauso riefen Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobaccillus* bei Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil keine erheblichen

Verbesserungen hervor. Ebenso war auch der Einfluss von Nährsubstrat gering. Alle Behandlungsvarianten waren gleich der unbehandelten Kontrolle.

Dritte Bonitur im Juni 04

Eine dritte Bonitur des Bedeckungsgrades wurde 9 Monate nach Versuchsbeginn durchgeführt.

Tab. 22: Relativwerte des Bedeckungsgrades (in %) in Abhängigkeit von der Behandlung mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompostsubstrat (Versuchsserie 3)

Substrate	Varianten	Oktober 2003	November 2003	Juni 2004
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	2,54 a	2,82 a	37,2 a
	K2c1	2,47 a	2,68 a	59,6 b
	a2b1c1	2,45 a	2,62 a	52,7 ab
	a2b2c1	2,6 a	2,76 a	55,4 ab
	a3b1c1	2,7 a	2,79 a	59,4 b
	a3b2c1	2,53 a	2,62 a	59,5 b
Geotextilmatten	K1c2	3,34 a	3,42 a	28,6 a
	K2c2	3,04 a	3,12 a	27,7 a
	a2b1c2	2,94 a	3,08 a	28,2 a
	a2b2c2	2,99 a	3,11 a	33,6 a
	a3b1c2	2,5 a	2,8 a	17,6 a
	a3b2c2	2,76 a	2,87 a	17,3 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K3c4	4,07 a	4,16 a	54,3 a
	K2c4	3,48 a	3,56 a	66,5 a
	a2b1c4	3,17 a	3,28 a	58,1 a
	a2b2c4	3,42 a	3,54 a	55,8 a
	a3b1c4	3,89 a	4,06 a	60,3 a
	a3b2c4	3,6 a	3,71 a	71,3 a

* Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Ziegelbruchsubstrat

Die erste Bonitur des Bedeckungsgrades erfolgte einen Monat nach Versuchsbeginn am 23.10.03. Es wurden weder signifikante Unterschiede zwischen der unbehandelten Kontrolle noch den Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* nachgewiesen. Alle Varianten waren gleich. Eine positive Wachstumsbeeinflussung durch Behandlungen mit den Bakterien sowie Nährsubstrat konnte zu 1. Boniturzeitpunkt nicht festgestellt werden.

Eine zweite Bonitur wurde einen Monat danach am 24.11.03 durchgeführt. Wie die Tab. 22 zeigt, waren zum diesem 2. Boniturzeitpunkt auch keine statistisch gesicherten Unterschiede zu beobachten, im Unterschied zu dem Vorversuch im Sommer (Versuchsserie 2), wo zeitgleich nach 7 bis 8 Wochen auf Ziegebruchsubstrat die deutlichsten und signifikanten Unterschiede bei der Behandlung mit Nährsubstrat allein und bei der Kombinationen von Nährsubstrat mit den Bakterien gefunden wurden.

Bei der Betrachtung der Boniturergebnisse vom Juni 04, ca. 9 Monate nach Versuchsbeginn, konnten zu diesem 3. Boniturzeitpunkt die ersten signifikanten Unterschiede bei der Einzelapplikation des Nährsubstrats (K2c1) und dessen Kombinationen mit *B. subtilis* (a3b1c1) sowie der Kombination mit *Lactobacillus* (a3b2c1) gegenüber der unbehandelten Kontrolle (K1c1) nachgewiesen werden. Jedoch gab es bei der Einzelapplikation von *Bacillus subtilis* (a2b1c1) und *Lactobacillus* (a2b2c1) statistisch keine Unterschiede im Vergleich mit der unbehandelten Kontrolle.

Allerdings hat sich diesmal die Vegetationsentwicklung im Unterschied zu Versuchsserie 2 im Sommer verlangsamt, weil die Pflanzen dem langen Winter standhalten mussten. Es wurde hier trotz 9 Monaten Zeitspanne (von September 03 bis Juni 04) die höchste Bestandsentwicklung der Parzellen von nur 60 % lediglich bei der Einzelapplikation des Nährsubstrats (K2c1), der Kombination von *Bacillus subtilis* mit Nährsubstrat (3b1c1), der Kombination von *Lactobacillus* mit Nährsubstrat (a3b2c1) erreicht. Währenddessen war im Komplexversuch zum zweiten Boniturtermin eine schnellere Bestandsentwicklung von 100 % bei den jeweiligen Behandlungsvarianten in nur kurzer Zeit nach ziemlich 7 Wochen spürbar.

Geotextilmatten

Während des gesamten Versuchszeitraumes wurden auf Geotextilmatten keine signifikanten Unterschiede zwischen der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Behandlungsvarianten mit *Bacillus subtilis* ebenso wie mit *Lactobacillus* festgestellt. Der Einfluss von *Bacillus*

subtilis und *Lactobacillus* sowohl bei der Einzelapplikation als auch in deren Kombination mit Nährsubstrat war nicht eindeutig. Unter Berücksichtigung der ermittelten Boniturwerte deutet sich an, dass die Geotextilmatten für die Bakterien einen nicht besonders passenden Standort darstellen, da sie sehr arm an Nährstoffen sind und den Bakterien vermutlich keinen echten Rhizosphärenbereich anbieten. Dies spiegelt sich folglich in der Vegetationsentwicklung auf Geotextilmatten wider.

Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil

Um das Ziegelbruchsubstrat biologisch aktiver zu machen, wurde das Substrat mit 10 % Kompostanteil vermischt. Dabei zeigten die Versuchsergebnisse trotzdem keine erheblichen Wuchsverbesserungen. Signifikante Unterschiede wurden an dem ersten und zweiten Boniturtermin nicht gefunden.

Eine wachstumsfördernde Wirkung erfolgte bei dem 3. Boniturtermin im Juni 04. Trotzdem zeichneten sich aber bei der Bestandsentwicklung zwischen der unbehandelten Kontrolle und den übrigen Behandlungsvarianten keine signifikanten Unterschiede ab. Es waren selbst scheinbar deutliche Wachstumsförderungen, die statistisch nicht gesichert werden konnten.

Zwar wurde nach der Zugabe von Kompost in der mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sowie Nährsubstrat behandelten Parzellen eine verbesserte Vegetationsentwicklung gegenüber der unbehandelten Kontrolle erzielt, aber diese blieb gering.

Der höchste Bedeckungsgrad wurde bei der Kombination von *Lactobacillus* mit Nährsubstrat (a3b2c4) erreicht, der von der Behandlung mit Nährsubstrat (K2c4) (allein appliziert) sowie der Kombination von *Bacillus subtilis* mit dem Nährsubstrat (a3b1c4) gefolgt wurde. Der Effekt einer kombinierten Anwendung von Bakterien mit Nährsubstrat war besser als die Einzelapplikation der Bakterien (a2b1c4, a2b2c4).

Die durch Ermittlung von Sprosslängen und Triebanzahlen sowie Bedeckungsgraden tendenziell erreichten Wachstumsverbesserungen durch Behandlungen mit *B. subtilis*, *Lactobacillus* und Nährsubstrat auf Ziegelbruchsubstrat gegenüber Ziegelkompostsubstrat und Geotextilmatten ist nicht nur aus der besonderen Struktur dieses Substrates erklärbar (Versuchsserie 3), sondern es kommt auch den Versuchsbedingungen bzw. Umwelteinflüssen wie Temperatur, pH-Wert und Feuchtigkeit eine große Bedeutung zu.

Zu vermerken ist jedoch, dass in mit Mikroorganismen reichem Ziegelkompostsubstrat das Wachstum von *Bacillus subtilis* weniger intensiv war als im Ziegelbruchsubstrat. Die Populationsdynamik von *B. subtilis* wird somit vornehmlich durch die abiotischen Faktoren (Temperatur und Feuchtigkeit), sowie die Konkurrenz der autochthonen Mikroflora im Substrat beeinflusst (GANTCHEVA 1993).

KREBS et al. (1998) und ZIMMER (2003) schrieben der Temperatur eine entscheidende Rolle zu, die sich unmittelbar auf die Populationsdichten von Mikroorganismen und deren Aktivität auswirkt. REDDY & RAHE (1989) hoben hervor, dass das Überleben von *B. subtilis* B-2 in der Rhizosphäre durch hohe Temperaturen, hohe pH-Werte und hohe Feuchtigkeit günstig beeinflusst wird, wobei sie die Temperatur für die wichtigste Variable hielten.

Wie in den Versuchen von GUPTA & UTKEHDE (1986) bewiesen, ist die Aktivität von *Bacillus subtilis* bei etwas höherem pH-Wert und Temperaturen deutlicher ausgeprägt. Sie ermittelten in einem Temperaturbereich zwischen 21 °C und 28 °C und bei pH-Werten zwischen 5 und 8 die maximale Produktion antifungaler Substanzen durch *B. subtilis*. Dies erklärt vermutlich, weshalb sich Behandlungsvarianten auf Ziegelbruchsubstrat signifikant von der unbehandelten Kontrolle gegenüber dem Ziegelkompostsubstrat unterscheiden.

Nach Angaben der Laboranalyse ergab sich im Ziegelbruchsubstrat ein höherer pH-Wert (6,9) gegenüber dem Ziegelkompostsubstrat mit 6 (vgl. Tab. 2). Es wurden ebenfalls neben dem höheren pH-Wert im Ziegelbruchsubstrat höhere Temperaturwerte im Oktober und November festgestellt (siehe Anhang).

Durch höhere Temperaturen und höheren pH-Wert im Ziegelbruchsubstrat werden im Vergleich mit den anderen Substrattypen günstigere Versuchsbedingungen für die Aktivität der Bakterien geschaffen. In Abhängigkeit vom pH-Wert und dem Temperatureinfluss lässt sich diese Feststellung begründen.

Außerdem fand ZIMMER (2003) nach seiner Erfahrung mit dem Nutzbakterium heraus, dass dessen positive Effekte auf die Kulturpflanzen hinsichtlich phytoeffektiver Wirksamkeit und Pathogene unterdrückender Wirkung bei leichten Böden, die keine optimalen Bedingungen für die Pflanzen boten, am größten waren. Aufgrund dieser Feststellung werden die ermittelten Daten auf dem nährstoffarmen Ziegelbruchsubstrat weiter bestätigt.

5.3.3. Nachweis der Wirksamkeit der inokulierten *Bacillus subtilis*- und *Lactobacillus*-Stämme auf das Pflanzenwachstum

Die Überprüfung der Aktivität der bereits inokulierten Bakterien (Versuchsserie 3) erfolgte diesmal im Gefäßtest mit Keimpflanzen der Sommergerste.

Die Probenahme von Substrate erfolgte am 23.03.04. Dabei wurden jeweils 6 Proben von Ziegelbruchsubstrat und 6 Proben von dem Gemisch Ziegelbruch mit 10 % Kompostanteil des Feldversuchs aufbereitet, wobei es insgesamt (13) Proben waren, davon sind 12 Proben Prüfsubstrat und eine Probe vom Vergleichsubstrat bzw. Einheitserde 0 (EE0) bereitgestellt worden. Jede Probe entsprach einer Variante.

Die Versuchsbedingungen in den Klimakammern sowie die Vorgehensweise mit den frischen Substratproben und allen an dieser Stelle nicht beschriebenen Verfahren entsprachen der im (Abschnitt 5.2.3.1. Gefäßtest) angegebenen Methodik. Zum Aktivitätsnachweis der applizierten Bakterien erfolgte eine Bonitur am 05.04.04. Die bakterielle Wirksamkeit war indirekt über die Erfassung von Sprossfrischmassen der Pflanzen zu bestimmen.

Tab. 23: Relativwerte für Sprossfrischmassen im Keimtest mit Sommergerste

Substrate	Varianten	% Sprossfrischmasse
Einheitserdekontrolle	EE0	100 % b
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	60,9 a
	K2c1	60,9 a
	a2b1c1	63,2 a
	a2b2c1	55,1 a
	a3b1c1	59,7 a
	a3b2c1	55,1 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K3c4	54 a
	K2c4	52,8 a
	a2b1c4	51,7 a
	a2b2c4	51,7 a
	a3b1c4	59,7 a
	a3b2c4	54 a

* Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Sprossfrischmassen

Bezogen auf den Frischmasseertrag unterschied sich das Vergleichsubstrat EE0 signifikant von den Behandlungsvarianten beim Ziegelbruchsubstrat. Unterschiede zwischen den übrigen Behandlungsvarianten gab es jedoch nicht. Alle Behandlungsvarianten waren gleich der unbehandelten Kontrolle. Während der relative Wert für das Frischgewicht der unbehandelten Einheitserdekontrolle EE0 bei 100 % lag, schwankten die Relativwerte des Frischgewichts der Gerste in der Behandlungsvarianten von 55 bis 60 % der Einheitserdekontrolle.

Betrachtet man Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil, so ergibt sich daraus ein ähnliches Bild, wie vorher. Das Vergleichsubstrat EE0 war auch bestens, *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* konnten sowohl bei der Einzelapplikation als auch bei der Kombination mit dem Nährsubstrat keine Wachstumsverbesserungen erbringen. Eben so wirkte auch das Nährsubstrat. Es wurden weder signifikante Unterschiede noch positive Effekte durch die Behandlungen gefunden.

Signifikante Unterschiede waren lediglich bei der Einheitserdekontrolle EE0 gegenüber den übrigen Behandlungsvarianten zu verzeichnen.

Die Testergebnisse sprechen dafür, dass bisher keine Bioeffekte im Substrat festgestellt wurden, da das unbehandelte Vergleichsubstrat EE0 bestens war. Der Einfluss der Behandlung mit Bakterien blieb ebenfalls aus.

Es stellt sich heraus, dass die Bakterien bei niedrigen Temperaturen, insbesondere im Bezug auf die Vermehrung und Bildung von wachstumsstimulierenden Stoffen nicht besonders aktiv waren. Denn es wird nicht nur die Besiedlung von Pflanzenwurzeln maßgeblich von der Temperatur beeinflusst, sondern ebenso die Aktivität der Bakterien (JAMAL 1993, ZIMMER 2003). Denn es ist nicht ausgeschlossen, dass bei solchem niedrigen Temperaturniveau das bakterielle Wachstum gehemmt wird. Außerdem ist auch bekannt, dass der Stamm *B. subtilis* FZB24® sein besseres Wachstum bei höheren Temperaturen gegenüber niedrigen Temperaturen erreicht (KILIAN et al. 1998). Dies könnte vermutlich für die Nichtnachweisbarkeit der bakteriellen Aktivität verantwortlich sein.

6. Untersuchungen in der Klimakammer

In der Klimakammer, wo es beste Voraussetzungen für die Entwicklung der inokulierten Bakterien und Pflanzen gibt, wurde parallel zum Freilandversuch (Versuchsserie 3 Herbst / Winter) ein weiterer Versuch zur Prüfung der Wirksamkeit der Sporensuspension von *Bacillus subtilis* durchgeführt. Der Einfluss des Applikationszeitpunktes der Bakterien auf die Vegetationsentwicklung wurde diesmal im Unterschied zu den Freilandversuchen nicht miteinbezogen. Außerdem wurden weder *Lactobacillus* noch Nährsubstrat angewandt.

6.1. Untersuchungsmethodik Klimakammerversuch

Als Vegetationssysteme fanden Ziegelbruchsubstrat, Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil und Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil Verwendung. Das Ziegelbruchsubstrat wird biologisch als wenig aktives Substrat bewertet. Ein Einsatz von Bakterien und Kompost bietet eine Möglichkeit, die Pflanzenanzucht zu optimieren.

Die verwendeten Substrate in den Klimaschränken wurden auf Plastikkisten von 30 x 40 cm Größe und 5,5 cm Höhe verteilt, wie in Tab. (24) angegeben. Dann wurden Sprosse von *Sedum album* auf die Substratoberfläche gleichmäßig, jeweils in 5 cm Abstand, ausgelegt.

Tab. 24: Aufwandmengen an Substraten

Substrat-Varianten	Einsatzmengen / Parzelle	
	Ziegelbruchsubstrat	Kompost
Ziegelbruchsubstrat	6 l	0 l
Ziegelbruch. + Kompost 10 %	5,4 l	0,6 l
Ziegelbruch. + Kompost 20 %	4,8 l	1,2 l
Gesamt /l	64,8 l	7,2 l

Weiterhin gab es keinen Bedarf an Anspritzmasse, da der Versuch in Klimakammern durchgeführt wurde. Das Bakterium von *Bacillus subtilis* lag in Form eines Granulates mit einer Keimdichte von 5×10^{10} cfu/ml vor. Aus diesem Granulat wurden Ausgangskonzentrationen (Titer 2×10^9 cfu/ml, 2×10^8 cfu/ml) hergestellt.

Der Versuch wurde am 06.01.04 angesetzt. Die Wirksamkeitsprüfung der Bakterien fand unter für das Pflanzenwachstum weitgehend optimierten Bedingungen und nicht unter Stressbedingungen statt. Die klimatischen Verhältnisse in der Klimakammer können wie folgt beschrieben werden:

Tageslänge:	Tag-Nachtperiode 16: 8 (Langtag)
Temperatur:	20 °C am Tag 18 °C in der Nacht
Luftfeuchtigkeit:	60 % (tags) 70 % (nachts)
Lichtintensität:	10 klx
Bewässerung:	60 ml täglich je Kiste

Am 15.01.04 erfolgte die Applikation von *B. subtilis* als Sporensuspensionen des im 60 °C warmen Wasser aufgelösten Granulates mit Keimdichten von (2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml) und entsprechenden Aufwandmengen von (0,2 bzw. 0,02 g/l). Es wurden drei Wiederholungen zu jeder Behandlungsvariante angelegt. Eine nochmals wiederholte Bakterienbehandlung fand am 06.02.04 statt. Als unbehandelte Kontrolle diente eine Wasserbehandlung.

Die erste Konzentration von (2×10^9 cfu/ml) wurde mit b1 bezeichnet, während sich b2 auf die zweite Konzentration von (2×10^8 cfu/ml) bezog. Für den Faktor des Substrats wird C1 für das Ziegelbruchsubstrat gewählt. Es werden weiterhin C5 als Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil und C6 als Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil benannt. Eine Gegenüberstellung von Behandlungsvarianten, differenziert nach Substraten, vermittelt die Tab. (25). Diese umfasste 9 Varianten (6 Kombinationen mit *Bacillus subtilis* und 3 Kontrollen).

Die Dauerwirkung von *B. subtilis* war indirekt über den Einfluss der Bakterienbehandlung auf das Pflanzenwachstum in vier nacheinander folgenden Monaten zu betrachten. Dabei wurden Wachstumsparameter wie Sprosslängen und Triebanzahlen bestimmt. Es wurden jeweils 5 Pflanzen vermessen.

Tab. 25: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten im Klimakammerversuch

Varianten	Applikationen	Anzahl der Wiederholungen	Pflanzen je Wiederholung
K1c1	unbehandelte Kontrolle -Substrat 1	3	5
K2c5	unbehandelte Kontrolle -Substrat 5	3	5
K3c6	unbehandelte Kontrolle -Substrat 6	3	5
b1c1	Behandlung mit <i>B. subtilis</i> -Konzentration 2×10^9 cfu/ml /Substrat 1	3	5
b1c5	Behandlung mit <i>B. subtilis</i> -Konzentration 2×10^9 cfu/ml /Substrat 5	3	5
b1c6	Behandlung mit <i>B. subtilis</i> -Konzentration 2×10^9 cfu/ml /Substrat 6	3	5
b2c1	Behandlung mit <i>B. subtilis</i> -Konzentration 2×10^8 cfu/ml /Substrat 1	3	5
b2c5	Behandlung mit <i>B. subtilis</i> -Konzentration 2×10^8 cfu/ml /Substrat 5	3	5
b2c6	Behandlung mit <i>B. subtilis</i> -Konzentration 2×10^8 cfu/ml /Substrat 6	3	5

6.2. Ergebnisse und Diskussion

Erste Bonitur

Die erste Bonitur erfolgte am 16.01.04. Dabei wurden Wurzelanzahlen und Wurzellängen erfasst. Die mittleren Wurzelparameter in Abhängigkeit von der Behandlung mit den *Bacillus subtilis* -Sporensuspensionen 2×10^9 /ml und 2×10^8 /ml sind in der Tab. (26) dargestellt.

Tab. 26: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit *B. subtilis* 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, 1. Bonitur in der Klimakammer

Substrate	Varianten	Wurzellänge (mm)	Wurzelanzahl
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	3,03 a	2,26 a
	b1c1	4,14 ab	3,80 a
	b2c1	3,53 ab	3,83 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K2c5	3,68 ab	3,36 a
	b1c5	6,79 ab	4,06 a
	b2c5	7,88 ab	3,60 a
Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil	K3c6	2,86 a	3,80 a
	b1c6	6,02 ab	3,86 a
	b2c6	8,65 b	4,40 a

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Wurzellängen

Beim Ziegelbruchsubstrat wurden zwischen der unbehandelten Kontrolle K1c1 und den mit *Bacillus subtilis* -Behandlungsvarianten zu diesem Boniturzeitpunkt keine Unterschiede bezüglich mittlerer Wurzellängen der Sedumvegetation festgestellt.

Nach der Kompostzugabe hat sich die Lage etwas verbessert. Eine positive Wachstumsförderung wurde durch *B. subtilis*- Sporensuspension 2×10^9 und 2×10^8 erzielt, verglichen mit der Kontrolle K2c5. Signifikante Unterschiede gab es nicht. Verdoppelt man den Kompostanteil im Substrat bis zu 20 %, konnte hier nur zwischen der Sporensuspension 2×10^8 (b2c6) und der Kontrolle K3c6 ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Gleiche Unterschiede waren jedoch zwischen der Sporensuspension 2×10^8 und der 2×10^9 zu

beobachten. Die Unterschiede der mittleren Wurzellängen der übrigen Varianten waren nicht signifikant.

Wurzelszahlen

Bei Betrachtung der mittleren Wurzelszahlen der Sedumvegetation konnten sowohl durch Applikation der *B. subtilis* Sporensuspension 2×10^9 als auch durch die Sporensuspension 2×10^8 bei allen Substrattypen im Vergleich zu der unbehandelten Kontrollvariante keine statistisch gesicherten Unterschiede festgestellt werden.

Zweite Bonitur

Die zweite Bonitur erfolgte am 30.01.04. Dabei wurden Triebanzahlen und Sprosslängen ermittelt. Die mittleren Wachstumsparameter in Abhängigkeit von der Behandlung mit den *Bacillus subtilis* –Sporensuspensionen 2×10^9 /ml und 2×10^8 /ml sind in der Tab. (27) angegeben.

Tab. 27: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit *B. subtilis* 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, 2. Bonitur in der Klimakammer

Substrate	Varianten	Sprosslänge (cm)	Triebanzahl
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	4,12 a	2,23 a
	b1c1	4,68 abc	2,53 a
	b2c1	4,5 ab	2,26 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K2c5	4,36 ab	3,26 a
	b1c5	5,20 bcd	4,53 ab
	b2c5	5,26 bcd	4,53 ab
Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil	K3c6	5,20 bcd	3,30 a
	b1c6	6,98 cd	6,53 b
	b2c6	7,10 c	7,06 b

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Sprosslängen

Ein signifikanter Unterschied zwischen der Kontrolle und den Behandlungsvarianten ließ sich bisher auf Ziegelbruchsubstrat nicht feststellen. Eine 10%ige Kompostzugabe wirkte sich positiv auf das Wachstum der Sedumvegetation aus. Die mit *Bacillus subtilis* behandelten Varianten b1c5 und b2c5 waren deutlich besser als die unbehandelte Kontrolle K2c5. Es zeigten sich jedoch zwischen Kontrolle und Behandlungsvarianten keine signifikanten Unterschiede.

Verbesserte Wuchsleistungen wurde nach Verdoppelung der Kompostanteile bis 20 % erzielt. Im Unterschied zu der unbehandelten Kontrolle K3c6 wurde hier die höchste mittlere Sprosslänge bei der Behandlung mit den *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^8 (b2c6) erreicht, die von der Sporensuspension 2×10^9 (b1c6) gefolgt wurde. Signifikante Unterschiede hinsichtlich mittlerer Sprosslängen der Sedumvegetation konnten nach der Applikation der Sporensuspension 2×10^9 (b1c6) und Sporensuspension 2×10^8 (b2c6) nachgewiesen werden. Unterschiede zwischen Behandlungsvarianten gab es nicht.

Triebanzahlen

Die Behandlungsvarianten waren auf Ziegelbruchsubstrat gleich der unbehandelten Kontrolle. Eine deutliche Wirkung der inokulierten Mikroorganismen war nicht erkennbar. Mit 10 % Kompostzugaben wurden bessere Ergebnisse nach der Applikation der *Bacillus subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 (b1c5) und der Sporensuspension 2×10^8 (b2c5) gegenüber der unbehandelten Kontrolle registriert. Es wurden jedoch keine statistisch gesicherten Unterschiede festgestellt. Verstärkte Wachstumsförderungen waren mit der 20%igen Kompostzugabe zu beobachten. Die höchste und signifikante mittlere Triebanzahl haben Behandlungen mit *Bacillus subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 (b1c6) und der Sporensuspension 2×10^8 (b2c6) gegenüber der unbehandelten Kontrolle (K3c6) erbracht. Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten waren nicht signifikant.

Dritte Bonitur

Eine weitere Bonitur von Triebanzahlen und Sprosslängen wurde am 25.02.04 durchgeführt. Die durchschnittlichen Boniturnwerte in Abhängigkeit von der Behandlung mit den *Bacillus subtilis*-Sporensuspensionen 2×10^9 /ml und 2×10^8 /ml sind in der folgenden Tab. (28) aufgeführt.

Tab. 28: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *B. subtilis* 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, 3. Bonitur in der Klimakammer

Substrate	Varianten	Sprosslänge (cm)	Triebanzahl
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	4,20 a	3,43 a
	b1c1	5,05 ab	4,40 a
	b2c1	4,72 a	3,46 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K2c5	4,98 a	5,56 a
	b1c5	6,58 ab	7,80 ab
	b2c5	6,37 ab	6,93 ab
Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil	K3c6	5,5 a	6,16 ab
	b1c6	7,68 b	11,06 b
	b2c6	7,6 b	11,40 b

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Sprosslängen

Bei den mittleren Sprosslängen der Sedumvegetation zeigten sich zwischen Behandlungen mit *Bacillus subtilis* und der unbehandelten Kontrolle auf Ziegelbruchsubstrat keine Unterschiede. Einen visuellen positiven Einfluss gab es ausschließlich bei der Behandlung einer *B. subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 (b1c5) und der Sporensuspension 2×10^8 (b2c5) nach der 10%igen Kompostzugabe. Ein verbessertes Wachstum wurde gegenüber der unbehandelten Kontrolle K2c5 erzielt. Die größte mittlere Sprosslänge wurde nach einer Verdoppelung des Kompostgehaltes im Substrat bis 20 % ermittelt. Hieraus ergab sich eine verstärkte Wirkung der Bakterien auf die mittlere Sprosslänge, im Unterschied zu der unbehandelten Kontrolle (K3c6). Die Wachstumsförderungen waren bei der *B. subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 (b1c6) und der Sporensuspension 2×10^8 (b2c6) deutlich signifikant gegenüber der Kontrolle.

Triebanzahlen

Weder signifikante Unterschiede, noch ein Einfluss auf die mittleren Triebanzahlen nach der *Bacillus subtilis*- Applikation wurde zwischen den Behandlungsvarianten auf Ziegelbruchsubstrat nachgewiesen. Eine deutliche Wachstumsförderung erfolgte nach der Kompostzugabe. Dies bezieht sich auf die Behandlung mit der *Bacillus subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 (b1c5) und der Sporensuspension 2×10^8 (b2c5). Der Unterschied zur Kontrolle K2c5 war bisher jedoch noch nicht signifikant. Signifikante Unterschiede konnten nach einer 20%igen Kompostzugabe bei der *B. subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 (b1c6) und der Sporensuspension 2×10^8 (b2c6) nachgewiesen werden. Diese beiden waren die besten aller Behandlungsvarianten.

Abschlussbonitur

Die Abschlussbonitur erfolgte am 15.04.04. Währenddessen wurden wieder Triebanzahlen und Sprosslängen ermittelt. Tabelle (29) zeigt Boniturwerte in Abhängigkeit von der Behandlung mit den *Bacillus subtilis* –Sporensuspensionen 2×10^9 /ml und 2×10^8 /ml.

Tab. 29: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit *B. subtilis* 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, Abschlussbonitur in der Klimakammer

Substrate	Varianten	Sprosslänge (cm)	Triebanzahl
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	4,28 a	6,73 a
	b1c1	5,47 abc	9,73 ab
	b2c1	4,87 ab	6,93 a
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K2c5	5,37 abc	11,10 abc
	b1c5	6,99 bc	14,26 abc
	b2c5	6,94 bc	11,33 abc
Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil	K3c6	5,90 abc	11,83 abc
	b1c6	7,89 c	21,80 c
	b2c6	7,71 c	19 bc

* Werte mit gleichen Buchstaben zeigen keine Unterschiede im Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)

Sprosslängen

Die mittleren Werte der Sprosslängen und die mittleren Triebzahlen der Sedumvegetation in Abhängigkeit von der bakteriellen Applikation für die Abschlussbonitur sind in Tab. (29) dargestellt. Dabei wurden durch Behandlung mit dem *Bacillus subtilis*-Stamm FZB 24 - im Vergleich zu der unbehandelten Kontrolle auf Ziegelbruchsubstrat - sowohl bei der Konzentration von 2×10^9 -Sporensuspension/ml, als auch bei der 2×10^8 -Sporensuspension/ml statistisch keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Jedoch gab es leichte Wachstumsförderungen bei den mit *B. subtilis* behandelten Varianten, und zwar bis zu 1 cm Sprosslänge mehr bei der Konzentration 2×10^9 cfu/ml b1c1 als bei der Kontrolle K1c1. Demgegenüber war eine geringere Wirkung auf die Sprosslänge bei der Konzentration 2×10^8 cfu/ml b2c1 zu beobachten.

Erste signifikante Unterschiede konnten nach der 10%igen Kompostzugabe im Unterschied zu den vorangegangenen Bonituren statistisch nachgewiesen werden. Das war lediglich bei der Behandlung mit *B. subtilis* b1c5 und b2c5 gegenüber der unbehandelten Kontrolle auf Ziegelbruchsubstrat K1c1 zu bemerken.

Zwischen den Behandlungsvarianten (b1c5, b2c5) und der unbehandelten Kontrolle K2c5 innerhalb dieses Substrates wurden bisher keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Es wurde aber ein verstärkter Zuwachs in den mit *Bacillus subtilis* behandelten Varianten gegenüber den jeweiligen Behandlungsvarianten auf dem Ziegelbruchsubstrat allein erreicht. Hier zeigten sich nur visuell positive Effekte infolge der Behandlung mit *Bacillus subtilis* in beiden angewandten Konzentrationen, bis zu ca. 2 cm Sprosslänge mehr gegenüber der unbehandelten Kontrolle K2c5. Die signifikanten Unterschiede betrugen bis zu 3 cm mehr in den Behandlungsvarianten (b1c5, b2c5), verglichen mit der unbehandelten Kontrolle K1c1 im Substrat ohne Kompost. Dies weist darauf hin, dass das Substrat mit 10 % Kompostanteil ein für das Wachstum besseres Substrat ist als das Ziegelbruchsubstrat ohne Kompost.

Bei der Betrachtung von mittleren Sprosslängen auf Substrat mit 20 % Kompostanteil stellt sich die bisher größte Sprosslänge dar. Es ergaben sich trotzdem zwischen den Behandlungsvarianten (b1c6, b2c6) und der unbehandelten Kontrolle K3c6 keine signifikanten Unterschiede. Während die mittlere Sprosslänge der Kontrolle etwa 6 cm

betrug, wurden ca. 2 cm mehr in den Behandlungsvarianten festgestellt. Aber der Unterschied zur Kontrolle war nur visuell feststellbar und blieb statistisch nicht gesichert.

Beim Vergleich dieser Behandlungsvarianten mit denjenigen im Ziegelbruchsubstrat bzw. Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil wurde hier ein zweifach verstärktes Wachstum gefunden, wie bei der unbehandelten Kontrolle im Substrat ohne Kompost. Die signifikante Wachstumsverbesserung bezieht sich hier nur auf die Behandlungsvarianten (b1c6, b2c6), im Vergleich mit der Behandlung mit *Bacillus subtilis* in der Konzentration 2×10^8 cfu/ml b2c1 und der unbehandelten Kontrolle K1c1 beim Ziegelbruchsubstrat. Jedoch sind die Unterschiede zwischen (b1c6, b2c6) und anderen Behandlungsvarianten gleich.

Triebanzahlen

Es zeigten sich zwischen den Behandlungsvarianten (b1c1, b2c1) hinsichtlich der Anzahl der gebildeten Seitentriebe und der unbehandelten Kontrolle K1c1 auf Ziegelbruchsubstrat keine signifikanten Unterschiede. Während die mittlere Anzahl der Seitentriebe in der unbehandelten Kontrolle und der mit *B. subtilis* Konzentration 2×10^8 cfu/ml (K1c1, b2c1) fast gleich ca. 7 Triebe war, betrug die mittlere Anzahl in der mit *B. subtilis*-Konzentration 2×10^9 cfu/ml (b1c1) 3 Triebe mehr als in beiden anderen Varianten. Trotzdem konnten zwischen diesen Varianten keine statistisch gesicherten Unterschiede nachgewiesen werden.

Betrachtet man Varianten des Substrates mit 10 % Kompostanteil, so ergibt sich hieraus ein verbessertes Wachstum im Vergleich mit Varianten des Ziegelbruchsubstrates. Besonders war in der Behandlungsvariante b1c5 mit der *B. subtilis*-Konzentration 2×10^9 cfu/ml ein besseres Wachstum gegenüber der *B. subtilis*-Konzentration 2×10^8 cfu/ml Behandlungsvariante b2c5 nachzuweisen, die gleich der unbehandelten Kontrolle K2c5 war. Obwohl positive Effekte durch Mischung mit Kompost im Unterschied zu Ziegelbruch ohne Kompost erzielt wurden, zeigten die Mittelwerte für Seitentriebe statistisch keine Unterschiede.

Verdoppelt man den Kompostanteil bis zu 20 % wie beim Substrat C6, so wurden signifikante Unterschiede festgestellt. Die höchste Wachstumsförderung wurde hier registriert. Jedoch blieb der Unterschied zwischen Varianten dieses Substrattyps selbst nicht signifikant. Nur die *Bacillus subtilis*-Behandlungsvarianten (Var. b1c6, b2c6) waren bestens, verglichen mit der

unbehandelten Kontrolle K3c6. Man sieht den großen Unterschied (ca. 10 Triebe mehr als die Kontrolle), aber es waren trotzdem alle Varianten statistisch gleichwertig, sowohl durch die Behandlung mit der *B. subtilis*-Konzentration 2×10^9 cfu/ml, wie auch mit der Konzentration 2×10^8 cfu/ml.

Die stärksten signifikanten Unterschiede, bezogen auf mittlere Seitentriebe, sind ausschließlich in den Behandlungsvarianten (Var. b1c6, b2c6), und zwar bis zu dreifach, wie bei den Varianten des Substrats ohne Kompost (K1c1, b2c1).

Aus diesen Ergebnissen steht fest, dass der Einfluss des Stammes von *Bacillus subtilis* mit Sporensuspension 2×10^9 cfu/ml besser und länger auf die mittlere Sprosslänge und Anzahl der Seitentriebe wirkt als die Konzentration 2×10^8 cfu/ml gegenüber der unbehandelten Kontrolle. Es scheint in diesem Fall, neben den höheren *Bacillus subtilis*-Konzentrationen im Substrat und dementsprechend auch zur Folge besseren Aktivitätsleistungen der Nutzbakterien bezogen auf die Stoffwechselproduktion, im Vergleich zu den niedrigen Bakterienkonzentrationen, zu bestehen (HENTSCHEL 2004).

Während in den Freilandversuchen erste signifikante Wachstumsförderungen nach der Bakterienapplikation (7 Wochen nach der Aussaat) festgestellt worden waren, wurde dies im Klimaschrank demgegenüber in kurzer Zeit (2 Wochen) nach der Introduktion in den Rhizosphärenbereich erreicht. Da die Wachstumsbedingungen in den Klimaschränken optimal waren, konnten sich die Bakterien schneller entwickeln bzw. etablieren. Es wurden bezüglich der Sprosslängen und der Triebanzahlen signifikante Unterschiede zwischen den *B. subtilis*-behandelten und unbehandelten Kontrollvariante festgestellt, wobei sich eine dauerhafte Aktivitätsentfaltung auf das Pflanzenwachstum durch die *B. subtilis*-Applikation nach bis zu 4 Monaten andeutete.

Zur Beurteilung dieser Wachstumsförderung beim Ziegelbruchsubstrat mit Kompost und damit besseren Wirkungen des Nutzbakteriums *Bacillus subtilis* gegenüber Ziegelbruchsubstrat ohne Kompost kommen verschiedene Theorien in Frage. Es werden als Ursache dafür, neben seiner groben Struktur und somit besseren Luftzirkulation, auch der höhere Gehalt an organischen Substanzen gesehen, die im Kompost enthalten sind (ZIMMER 2003). Dies bedeutet, dass durch das Einbringen der Mikroorganismen und des Komposts die mikrobielle

Aktivität des jeweiligen Substrates deutlich erhöht wurde, was sich wiederum in der Entwicklung der Vegetation widerspiegelte (ALSTRÖM 1987).

Es wird im konkreten Fall die Verfügbarkeit von Nährstoffen für die Bakterien als bedeutenderer Einflussfaktor auf deren Aktivität gesehen als der pH-Wert des Bodens. KREBS et al. (1998) schrieben der Temperatur und den Nährstoffverhältnissen eine Schlüsselrolle für die antagonistische Aktivität von *Bacillus subtilis* zu, während andere ökologische Faktoren von untergeordneter Bedeutung zu sein schienen.

6.3. Nachweis der Wirksamkeit der eingesetzten *Bacillus subtilis*- Konzentrationen auf das Pflanzenwachstum

Der Test der Nachweisbarkeit der applizierten Mikroorganismen bei dem Klimakammversuch wurde am 22.04.04 in ähnlicher Weise wie beim letzten Testverfahren mit der Sommergerste durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3.3.). Als Mischkomponente und Vergleichsubstrat diente Einheitserde 0 (EE0). Zur Prüfung fanden Ziegelbruchsubstrat, Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil und Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil Verwendung. Die Bedingungen waren ähnlich wie bei dem Sedum-Versuch in der Klimakammer.

Die Aktivität der inokulierten Bakterien war indirekt durch Ermittlung der bakteriellen Auswirkungen auf das vegetative Wachstum der Sommergerste am 03.05.04 zu bestimmen. Dabei wurden die Relativwerte an Frischmasse der Testpflanze in [g] erfasst (siehe Tab. 30).

Sprossfrischmassen

Bei den Relativwerten der Sprossfrischmasse (Tab. 30) war eine erhebliche Verbesserung des Pflanzenwachstums nach Applikation der *B. subtilis*-Sporensuspension 2×10^9 und 2×10^8 zu beobachten.

Während der relative Wert der Frischmasse beim Vergleichsubstrat EE0 bei 100 Prozent lag, zeigten sich dennoch beim Ziegelbruchsubstrat zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle gleiche Unterschiede. Signifikante Wirkungen durch die Behandlung mit *Bacillus subtilis* beider Sporensuspensionen konnten aber nicht festgestellt werden. Tatsächlich gab es sichtbare positive Wirkung, bezogen auf die Frischmasse bei den

Tab. 30: Relativwerte für Sprossfrischmassen bei Sommergerste in der Klimakammer

Substrate	Varianten	% Sprossfrischmasse	
Einheitserdekontrolle	EE0	100 %	a
Ziegelbruchsubstrat	K1c1	104,53	a
	b1c1	120,96	ab
	b2c1	115,86	ab
Ziegelbruchsubstrat mit 10 % Kompostanteil	K2c5	105,09	a
	b1c5	148,72	b
	b2c5	126,62	ab
Ziegelbruchsubstrat mit 20 % Kompostanteil	K3c6	117,84	ab
	b1c6	150,14	b
	b2c6	149,29	b

* Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Behandlungsvarianten (b1c1, b2c1). Die Wachstumsförderung war besser bei der Konzentration 2×10^9 cfu/ml als diejenige bei der Sporensuspension 2×10^8 und (bis zu 20 %) mehr gegenüber der unbehandelten Varianten (EE0, K1c1). Der Unterschied zwischen EE0 und der Kontrolle K1c1 war gering und unbedeutend.

Eine 10%ige Kompostzugabe konnte das Substrat im Vergleich zu Ziegelbruchsubstrat allein deutlich verbessern. Dadurch war hier eine Wachstumsförderung mit erhöhter Aktivität der inokulierten Bakterien-Suspensionen zu beobachten. Bei der Ermittlung der Relativwerte des Frischgewichts wurden signifikante Wachstumsverbesserungen bis zu 50 % in der *Bacillus subtilis*-Behandlungsvariante b1c5 Sporensuspension 2×10^9 erreicht gegenüber den unbehandelten Kontrollvarianten (EE0 und K2c5). Demgegenüber gelang die Förderung des Gewichts nur bis 25 % durch *B. subtilis*-Sporensuspension 2×10^8 . Jedoch wurden zwischen beiden Sporensuspensionen b1c5 und b2c5 statistisch keine gesicherten Unterschiede festgestellt .

Verdoppelt man den Gehalt an Kompost im Substrat bis 20 %, so konnte man das bisher beste Ergebnis erzielen. Zwar wurden innerhalb dieses Substrats statistisch keine gesicherten Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten und der Kontrolle K3c6 festgestellt, es zeigten sich jedoch signifikante Unterschiede sowohl durch die Sporensuspension 2×10^9 , als

auch bei der Sporensuspension 2×10^8 gegenüber der Einheitserdekontrolle EE0. Im Verhältnis zu der EE0 wurde eine Gewichtssteigerung in beiden Behandlungsvarianten (b1c6, b2c6) bis zu 50 % mehr als die unbehandelte Einheitserdekontrolle (EE0) erreicht.

Diese erkennbare Tendenz, dass die Aktivität der introduzierten Bakterien im Substrat größer war als im Rhizosphärenbereich, was sich besonders deutlich im Ziegelbruchsubstrat mit Kompost zeigt, belegt, dass *Bacillus subtilis* in nährstoffreicheren Substraten gut von der organischen Substanz leben kann, ohne auf die Wurzelexsudate der Kulturpflanzen angewiesen zu sein (ZIMMER 2003).

Es ergab sich bei diesem Testverfahren Folgendes:

1. Die Aktivität von *Bacillus subtilis* konnte anhand der Testergebnisse in der Klimakammer nachgewiesen werden.
2. Die *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^9 konnte bei allen Substrattypen bessere Wirkungen erzielen als bei der *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^8 .
3. Der Effekt der Applikation der *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^9 hielt zeitlich länger an als bei Applikation der *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^8 .
4. Die Testergebnisse bestätigten wiederholt, was auch bei dem Klimakammerversuch nach der Behandlung mit *Bacillus subtilis* erreicht wurde.
5. Obwohl es die gleiche Anwendungs- Methodik war, wurden bei dem zweiten Versuch in Berlin (Versuchsserie 3) im Vergleich zum Klimakammerversuch keine wachstumsstimulierenden Effekte beschrieben.
6. Im Unterschied zu dem Freilandversuch (Versuchsserie 3) waren bei dem Versuch in der Klimakammer günstigere Entwicklungsbedingungen für die Bakterien vorhanden.
7. Der Gesundheitszustand der Pflanzen war bestens bei der Behandlung mit *Bacillus subtilis* gegenüber der unbehandelten Kontrolle und der Einheitserdekontrolle EE0.
8. Infolge der Behandlung mit der *Bacillus subtilis*- Sporensuspension erwies sich das Prüfsubstrat bestens im Vergleich zum Substrat EE0.

7. Schlussfolgerungen und erste praktische Empfehlungen

Bei der Entwicklung von Vegetationssystemen für die Gleisbett-Naturierung finden Substrate großes Interesse, die in Anlehnung an TAPIA SILVA (2002) den Boden für die Naturierungssysteme bilden; und somit entscheiden Substrate sowohl über eine gute Vegetationsentwicklung auf und an begrünten Bauwerksflächen als auch über die Realisierung der ökologischen Auswirkungen der Naturierungen in Stadträumen.

Die in der Arbeit verwendeten Ziegelbruchsubstrate, Geotextilmatten und Mineralwollmatten sind arm an Nährstoffen und können damit keine optimalen Bedingungen für das Wachstum von Pflanzen darstellen. Über die Substrateigenschaften ist nun eine Vergleichbarkeit mit den extremen Bedingungen im nährstoffarmen Gleisbett möglich, insbesondere auch in Bezug auf die Substratschichtdicke. Ausgehend von einer möglichen Beeinflussung der Versuchsbedingungen durch Zugabe von Kompost kamen auch als Vergleich Ziegelbruchsubstrat mit und ohne Kompost zur Untersuchung.

Die Versuche an der Modellpflanze *Sedum album* wurden zum größten Teil im Freiland durchgeführt, aber auch unter kontrollierten Bedingungen in der Klimakammer. Dabei zeigten Behandlungen mit *B. subtilis* und *Lactobacillus* unterschiedliche Auswirkungen je nach Substratart. Die Anwendung von Nährsubstrat als Bodenhilfsmittel war ebenfalls für das Pflanzenwachstum besonders wirksam sowohl allein appliziert als auch in Kombination mit den Bakterien. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich Folgendes schlussfolgern:

Ziegelbruchsubstrat

Dieses Substrat vermittelt gute Voraussetzungen für die Entwicklung des aeroben Bakteriums *Bacillus subtilis*. Denn es zeichnete sich neben seiner groben Struktur und damit besseren Durchlüftung besonders auch durch Nährstoffarmut aus. Zudem kommen auch den höheren Temperatur- und pH-Werten eine große Bedeutung zu.

Laut Literatur von JAMAL (1993), KILIAN et al. (1998) und ZIMMER (2003) wurden Temperatur, Feuchte, pH-Wert, Bodenstruktur und Nährstoffversorgung als potenzielle Einflussfaktoren auf die Aktivitätsentfaltung eingebrachter Bakterien genannt. Unter den physikalischen substratgebundenen Einflüssen hinsichtlich der Phytoeffektivität von *B.*

subtilis werden, in reduzierender Weise der Konkurrenz der autochthonen Mikroorganismen, gute Wachstumsbedingungen der applizierten Bakterien begünstigt (GANTCHEVA 1993).

Es stellte sich heraus, dass die Aktivität der inokulierten Mikroorganismen bei diesem Substrat in der Rhizosphäre von Pflanzenwurzeln höher war als bei den anderen Substrattypen. Dies widerspiegelte sich folglich in der Vegetationsentwicklung. Es ergab sich bei dem Versuch im Ziegelbruchsubstrat Folgendes:

1. Die Wachstumsförderung war hier am deutlichsten bezüglich Sprosslänge, Anzahl der gebildeten Seitentriebe, Sprossdurchmessern und Sprosshöhen anzusehen. Ebenfalls wurde eine erhöhte Trockenstresstoleranz bei den Pflanzen wahrgenommen (keine Pflanzeausfälle)
2. Die Blütenanzahlen wurden nach den Behandlungen mit *B. subtilis*, der Applikation des Nährsubstrats sowie der Kombination von Nährsubstrat mit *Lactobacillus* beeinflusst. Signifikante Unterschiede wurden jedoch nicht gefunden.
3. Durch die Applikation von Nährsubstrat sowie durch dessen Kombination mit *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* lag der Bedeckungsgrad unter für das Bakterienwachstum günstigen Klimabedingungen in kurzer Zeit (7 Wochen) nach der Aussaat bei 100 %.
4. Dank dieser Grünflächendeckung und der hohen Blütenanzahlen in der behandelten Flächen konnte eine verbesserte Gleisbettgestaltung hergestellt werden.
5. Das Substrat ist insgesamt als relativ stabil gegenüber Umwelteinflüssen zu bewerten.

Ziegelbruchsubstrat mit Kompost

In Auswertung der Versuchsergebnisse in der Klimakammer war bereits eine tendenzielle Verbesserung des Pflanzenwachstums nach Zugabe des Komposts zu erkennen. Es konnte infolgedessen nachgewiesen werden, dass beim Gehalt von 20 % Kompost im Substrat bessere Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum erzielt wurden als bei 10 %.

Das bessere Pflanzenwachstum im Substrat mit Kompost gegenüber dem Ziegelbruchsubstrat ohne Kompost weist darauf hin, dass das Substrat für die Vegetationsentwicklung günstiger war. Es wird angenommen, dass die Aktivität von Bakterien in nährstoffreicherem Substrat höher war als die im nährstoffarmen Ziegelbruchsubstrat, da das organische Material im Substrat mit Kompost eine alternative Nahrungsquelle für die Bakterien darstellte anstelle von

Wurzelexsudaten der Kulturpflanzen. Wie schon ZIMMER (2003) feststellte, war besonders deutlich, dass die applizierten Mikroorganismen im nährstoffreichen Substrat aktiver waren als im Rhizosphärenbereich der Pflanzenwurzeln.

Unter den Substrateigenschaften kommt dem organischen Substanzgehalt und der damit verbundenen Mikroorganismenaktivität im Substrat als Konkurrenzfaktor sowohl für die Populationsdynamik als auch für die Aktivität von *B. subtilis* eine entscheidende Bedeutung zu. Diese Einflüsse scheinen allerdings in enger Wechselwirkung mit den Bedingungen für ein optimales Pflanzenwachstum zu stehen (GANTCHEVA 1993).

Geotextilmatten

Bei der Betrachtung der vegetativen Leistung der mit Nutzbakterien behandelten Parzellen gegenüber der unbehandelten Vegetationskontrolle auf Geotextilmatten konnten zwar an allen Boniturterminen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden, im Unterschied zum Substrat ohne Kompost und dem Ziegelbruchsubstrat mit Kompost war der Bedeckungsgrad deutlich geringer. Außerdem entwickelten sich die Pflanzen sehr langsam. Eine schnellere Bestandsentwicklung nach den Behandlungen mit *B. subtilis*, *Lactobacillus* und Nährsubstrat wurde deshalb nicht erzielt. Eine direkte Verbindung der applizierten Nutzbakterien mit der Vegetationsentwicklung ließ sich nicht feststellen.

Es wurden hier bei der alleinigen Anwendung des Nährsubstrats sowie dessen Kombination mit *Lactobacillus* und der Einzelapplikation der Bakterien, bezogen auf Trockenstress-Bedingungen weniger Pflanzenausfälle ermittelt, als in der unbehandelten Kontrolle. Die meisten Ausfälle waren bei der unbehandelten Kontrolle festzustellen. Es ergaben sich zwischen den Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle dennoch keine signifikanten Unterschiede.

Mineralwollmatten

Es traten auf Mineralwollmatten keine signifikanten Unterschiede durch Behandlungen mit den Bakterien hinsichtlich der Wuchseistung auf. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wachstumsbeeinflussung der Pflanzen und der bakteriellen Behandlung konnte deshalb nicht nachgewiesen werden. Die Literatur lieferte darüber auch keine näheren Informationen. Dass die Pflanzen dem langen Winter stand halten konnten, erklärt sich erneut mit dem

Hinweis, dass die Sedumvegetation standortangepasst, vor allem winterfest und anspruchslos ist. Weiterhin lässt sich aus dieser Darstellung der verwendeten Substrattypen vergleichsweise ableiten:

Es waren offensichtlich im Ziegelbruchsubstrat und im Ziegelbruchsubstrat mit Kompost bessere Bedingungen für die Etablierung von *B. subtilis* vorhanden im Vergleich zu anderen Substratarten. Da das Substrat mit *B. subtilis*-Sporen angereichert war, konnten die Bakterien keimen und wachsen und dabei eine pflanzenwachstumsfördernde Wirkung ausüben. Deshalb werden zur Naturierung von Gleisbettanlagen *Sedum*-Arten und als Substrate vornehmlich Varianten des Ziegelbruchsubstrats in Anwesenheit von *B. subtilis* und *Lactobacillus* für die Praxis empfohlen. Den Menschen bringen diese anspruchslosen Pflanzen eine nachhaltige Reduktion verkehrsbedingter Emissionen und Immissionen, eine Verbesserung des Klimas, eine Minderung der Staubbelastung und des Lärms. Ein Herbizideinsatz ist nicht nötig.

Aus gestalterischen Gesichtspunkten wirkt die Gleisbett-Naturierung vorteilhaft. Insbesondere unter dem Motto „Vegetation statt Schotter und Beton“ freut sich das Auge am neuen Grün in der Stadt. Das Aussehen der Pflanzen im Zusammenhang mit den Behandlungsvarianten differiert nach Substratart und wird im Anhang gezeigt.

Die Naturierung ist schließlich aus der Vielfalt der sich ergebenden Wechselwirkungen zwischen Straßenbahn, Gleisbett und angrenzendem Gelände mit dessen Vegetation heraus zu gestalten. Auffällig sind auch die prächtigen Blüten- und Blattfärbungen mancher *Sedum*-Arten und Sorten, vor allem unter der Stresseinwirkung, wird das gesamte Erscheinungsbild vom Gleisbett abwechslungsreich und wirkungsvoll ausgeprägt.

Die Grünflächen werden damit ihre Akzente im Gleisbett setzen. Sie dienen nicht nur ökologischen und ökonomischen Belangen, sondern sie sind auch als ein notwendiger Bestandteil des Großgrüns zu betrachten. Die Vegetationsflächen werden mehr und mehr zu einem schmückenden Beiwerk, zur Gleisbettgestaltung beitragen.

Im Unterschied zu den konventionellen Begrünungsverfahren, bei denen kein Einsatz von Bakterien bekannt war, konnte das Einbringen der Pflanzen und der Mikroorganismen hier eine Erhöhung der mikrobiellen Aktivität des jeweiligen Substrats auslösen (ALSTRÖM 1987). Dabei wurde eine Wachstumsverbesserung bei den Pflanzen hervorgerufen. Die Vegetation entwickelte sich schneller in den mit Bakterien und Nährsubstrat behandelten

Parzellen im Vergleich zu der unbehandelten Vegetationskontrolle. Es wurde unter ungünstigen Versuchsbedingungen, wie z. B. Trockenheit und Nährstoffmangel, eine erhöhte Stresstoleranz bei den Pflanzen wahrgenommen.

Aus den Versuchsergebnissen geht insgesamt hervor, dass die Substratbeschaffenheiten sehr stark sowohl das Pflanzenwachstum als auch die Entwicklung und die Wirksamkeit der introduzierten Bakterien beeinflussen.

Als Möglichkeiten für eine Nutzung von Rhizobakterien in Naturierungsprojekten unter praxisrelevanten gemäßigten Klimaverhältnissen für den schlecht mit Nährstoffen versorgten urbanen Bereich „Gleisbett“ lässt sich weiterhin Folgendes erwarten:

1. Um eine konkrete Beeinflussung der Bewurzelung infolge einer Bakterienapplikation festzustellen, empfiehlt sich im wahrsten Sinne des Wortes „Extensivbegrünung“, eventuell bei der Ausführung der Anspritznaturierung, Saatgut von *Sedum album* statt Sprosse aufzubringen. Da die eingebrachten Bakterien im Rhizosphärenbereich in unmittelbarer Nähe der zu bildenden Pflanzenwurzeln vorhanden sind, wird eine mögliche Wirkung von Umweltfaktoren, wie z. B. von extremer Trockenheit, Stress u.a. durch hohe Verdunstungsraten deutlich vermindert (vgl. 1. Bonitur). Die Pflanzen werden vor den extremen Umwelteinflüssen dadurch geschützt. Infolgedessen wird der Pflegeaufwand in Form von Bewässerung minimiert, gleichzeitig wird eine schnellere Aktivitätsentfaltung von Bakterien auf das Pflanzenwachstum erreicht gegenüber der Nassansaat von Sprossen.
2. Das Ziegelbruchsubstrat bewährt sich zur Begrünung im Gleisbett, da der Einsatz von Mikroorganismen, wie *B. subtilis*, auf einem solchen Substrat in jedem Fall Sinn macht.
3. Das Nährsubstrat ist in der Lage, eine pflanzenwachstumsfördernde Wirkung auszuüben, die zu einer Aktivitätserhöhung der Nutzbakterien nach ihrer Applikation an den Pflanzenwurzeln führen kann.
4. Unter Beachtung von optimalen Wachstumsvoraussetzungen für die zu inokulierenden Bakterien unter Praxisbedingungen ist in bevorzugter Weise eine Behandlung mit Bakterien im Spätfrühling bzw. Sommeranfang vorzunehmen, statt im Herbst.

Schlussfolgernd aus dieser Feststellung soll dadurch eine Lösung des bisher unbefriedigenden Zustands von Vegetationsentwicklung im Gleisbett zur Verwirklichung kommen.

8. Vorschläge für weitere Forschungsarbeiten

Es ließ sich anhand der durchgeführten Versuche zum Wirkmechanismus der Applikation von *Bacillus subtilis* und *Lactobacillus* auf das Wachstum von *Sedum album* feststellen, dass die beiden Nutzbakterien einen positiven Effekt auf die Vegetationsentwicklung ausübten. Zusätzlich war auch gleichzeitig eine verbesserte Wuchsleistung durch die Anwendung von Nährsubstrat spürbar.

Die Versuchsergebnisse belegten damit, dass das Vorhandensein von Rhizobakterien eine Art von Modifikation der Substrateigenschaften hierbeiführte. Dennoch war aber die Beigabe von Nährsubstrat sinnvoll, die bei den Pflanzen erhebliche Wuchsverbesserungen hervorrief. Aufgrund dieser Befunde sollten sich die weiterzuführenden Forschungen darauf konzentrieren.

Ein Schwerpunkt weiterer Untersuchungen sollte in der Suche nach Kombinationsmöglichkeiten von Nutzbakterien mit Bodenhilfsmitteln bestehen, welche die Aktivität der Bakterien im Substrat steigern. Die Kombination von Mikroorganismen mit dem Nährsubstrat war bereits im Feldversuch ein erster Schritt, Wachstum und Aktivität der Bakterien durch Zugabe fördernder Substanzen zu erhöhen. In dieser Richtung sollten die Arbeiten weitergeführt werden.

Es ist unter gestalterischen Aspekten empfehlenswert, Pflanzengesellschaften von Moosen und Sukkulenten zu verwenden. Damit die Naturierung abwechslungsreicher und vielfältiger erscheint, sind neben *S. album* weitere Arten, wie *S. acre* und *S. sexangulare* sowie *S. spurium* mit *S. reflexum* zur Erprobung besonders wertvoll. Es sind vorwiegend gutwüchsige Pflanzen mit schönen Blüten und guter Gruppenwirkung.

Es ist weiterhin zu prüfen, ob die *Lactobacillus*- Stoffwechselprodukte auch das Wachstum von Pflanzen unter den jeweiligen Kulturbedingungen beeinflussen können, da dieses Ziel in dieser Arbeit nicht angestrebt war. Deshalb sind zunächst im Labor Untersuchungen zur Aufklärung von Wirkungsursachen notwendig, um sie unter Feldbedingungen anwendbar zu machen. Um den Einsatz von Milchsäurebakterien zu fördern, kann es erforderlich sein, dass man Änderungen in ihrer Kulturmethode durchführt, um günstige Bedingungen für deren Lebensstrategie zu erzielen, die:

1. das Wachstum und Überleben der inokulierten Mikroorganismen erlauben und
2. ihre Ansprüche an Nährstoffe und Umwelt vollständig berücksichtigen,

3. ihre ökologischen Beziehungen und Wechselwirkungen mit anderen Mikroorganismen verstehen lassen sowie
4. das Wachstum und die Aktivität von Pflanzenpathogenen besser unterdrücken.

9. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer Begrünungsmethode mit einer beschleunigten Vegetationsentwicklung und hoher Trockenstresstoleranz der Sedumpflanzen auf dem oft nährstoffarmen Gleisbett. Es kamen dabei Vegetationssysteme wie Ziegelbruchsubstrat, Ziegelbruchsubstrat mit Kompost, Geotextilmatten und Mineralwollmatten zur Erprobung. Als Pflanzenmaterial für den Versuch dienten Sprosse der Sedumvegetation, die zuvor in 4 cm-Sprossteile geschnitten und danach mit der Anspritzmasse auf die Substratoberfläche aufgetragen waren.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden Kulturfiltrate von *B. subtilis* FZB 24 aus der Stammsammlung des FZB Biotechnik GmbH Berlin verwendet. Diese lagen in Form eines Granulats mit einer Ausgangskonzentration von 5×10^{10} cfu/ml vor. Die Laktobazillen und das Nährsubstrat wurden durch die Firmen Dr. Felgenträger & Co sowie A. & F. Hygiene GmbH Bitterfeld zur Verfügung gestellt. Beide befanden sich im flüssigen Zustand.

Die Applikationsmethodik von Bakterien erfolgte in Form einer Gießbehandlung, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. In einem dreijährigen Versuchszeitraum wurden alle Pflanzenbestände in ihrer Entwicklung beobachtet. Dabei war die Aktivität der inokulierten Mikroorganismen indirekt über den Einfluss der Bakterienbehandlungen auf die Vegetationsleistung zu ermitteln. Die Boniturergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Im allgemeinen konnte der Einsatz von *Bacillus subtilis*-FZB 24 WG, *Lactobacillus* und dem Nährsubstrat eine deutliche Wachstumsförderung hervorrufen, die sich insbesondere bei den oberirdischen Pflanzenteilen niederschlug. Die Wachstumsförderung war überall dort deutlich nachweisbar, wo annähernd ausreichende Bedingungen für das Pflanzenwachstum und die Etablierung der Nutzbakterien vorhanden waren. Das bestätigen eine Vielzahl von Versuchsergebnissen, die eine verbesserte Nährstoffaufnahme bei Anwesenheit von *Bacillus subtilis* belegen und über eine auxin-geförderte Wurzelentwicklung begründen.

Der Einfluss von *B. subtilis* auf die Vegetationsentwicklung war zum 1. Boniturzeitpunkt gering. Das deckt sich mit dem Hinweis, dass der Effekt der Bakterienbehandlung auf das Pflanzenwachstum bei einmaliger Behandlung bisher unerheblich war. Es bestanden zwischen der unbehandelten Kontrolle und den Behandlungsvarianten zumeist visuelle Unterschiede, die statistisch zum Teil nicht gesichert werden konnten.

Die Nutzung der introduzierten Bakterien erfolgte erst 7 Wochen nach Versuchsbeginn. Es waren signifikante Wachstumsverbesserungen nach einer zweimaligen Behandlung mit den Bakterien deutlicher an dem 2. Boniturtermin zu beobachten als vorher. Allerdings haben die Pflanzen an dem 2. Boniturtermin im Unterschied zum 1. Boniturtermin ein besseres Wurzelsystem gebildet, da die *Bacillus subtilis*- Stoffwechselprodukte im Rhizosphärenbereich der Pflanzen schließlich zur Verfügung standen.

Zur Ausprägung der wachstumsbeeinflussenden Leistungen von *Bacillus subtilis* hatte der Applikationszeitpunkt der Bakterien in Bezug auf das Testpflanzenwachstum keine Bedeutung. Es war sowohl nach der sofortigen Behandlung mit den Bakterien als auch nach zwei Wochen ein verbessertes Pflanzenwachstum zu beobachten. Diese tendenzielle Wuchsverbesserung nach der Behandlung mit *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* und Nährsubstrat wurde unabhängig vom Applikationstermin der Bakterien festgestellt.

Die Anwendung von Nährsubstrat hatte sowohl allein appliziert als auch in Kombination mit den Nutzbakterien eine signifikant verbesserte Wuchsleistung erbracht. Diese war deutlich stärker als bei der alleinigen Applikation der Bakterien. Es wird daher insgesamt eingeschätzt, dass das Nährsubstrat für die Praxis durchaus positiv zu bewerten ist.

Durch Einzelapplikation von *Bacillus subtilis* waren signifikante Unterschiede lediglich im Bezug auf die Sprosshöhe der Pflanzen zu beobachten. Demgegenüber konnte eine verstärkte Verbesserung des Pflanzenwachstums bei der Kombination von *Bacillus subtilis* mit dem Nährsubstrat erreicht werden. Es wurden anschließend zwischen der unbehandelten Kontrolle und Behandlungsvarianten statistisch gesicherte Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der gebildeten Seitentriebe, der Sprosslänge, des Sprossdurchmessers, der Sprosshöhe und des Bedeckungsgrades festgestellt.

Die Einzelapplikation von *Lactobacillus* rief bei den Pflanzen eine ähnliche Wirkung wie der *Bacillus subtilis*- Stamm FZB 24 hervor. Denn es konnten bei der alleinigen Anwendung von *Lactobacillus* im Vergleich zu der unbehandelten Kontrolle signifikante Unterschiede erzielt werden, nämlich bezüglich von Sprosslänge und Bedeckungsgrad. Ebenfalls war der Einfluss der Kombination von *Lactobacillus* mit dem Nährsubstrat auf die Vegetationsentwicklung wirkungsvoll. Besonders waren hier bei der Erfassung der mittleren Triebanzahlen, Sprosslängen, Sprossdurchmesser, Sprosshöhen und Bedeckungsgrade signifikante Unterschiede gegenüber der unbehandelten Kontrolle erkennbar.

Neben dem verbesserten Pflanzenwachstum wurden infolge der Applikation von Nährsubstrat und dessen Kombination mit *Lactobacillus* und der Behandlung mit *Bacillus subtilis* auch mehr Blüten gebildet als in der unbehandelten Kontrolle.

Die Behandlungen mit Nutzbakterien und die Einzelapplikation des Nährsubstrats führten außerdem auf Geotextilmatten tendenziell zu einem verminderten Stress bei den Pflanzen gegenüber der unbehandelten Kontrolle. Allerdings waren hier Unterschiede zwischen Behandlungsvarianten und der unbehandelten Kontrolle statistisch nicht signifikant. Es wurden aber trotzdem die in der Tendenz meisten Ausfälle bei der unbehandelten Vegetationskontrolle ermittelt. Es war zu vermuten, dass die deutlichen Pflanzenausfälle auf Geotextilmatten auch durch Umwelt- und substratspezifische Einflüsse zu begründen sind.

Beim Nachweis der Effektivität von Bakterien auf das Pflanzenwachstum (Versuchsserie 2) im Sommer ergab sich daraus hinsichtlich der Wachstumsförderung keinerlei Zusammenhang zwischen Testergebnissen und denen vom Feldversuch. Wachstumsstimulierende Effekte konnten hier nicht festgestellt werden, weil die Begleitbedingungen für die Testpflanzen im Versuchsfeld andere waren als in der Klimakammer.

Die Testergebnisse vom Aktivitätsnachweis (Versuchsserie 3) korrelierten ebenfalls nicht mit denen vom Feldversuch im Winter, da auch hier die Versuchsbedingungen nicht gleich waren.

Es wurden jedoch nach der Introduktion von *Bacillus subtilis* in den Rhizosphärenbereich zum ersten Mal beim Vorliegen optimaler Versuchsbedingungen in der Klimakammer erste signifikante Wachstumsbeeinflussungen hinsichtlich der mittleren Sprosslängen und der Triebanzahlen nach 2 Wochen, (Bonitur 30.01.04) festgestellt, während dasselbe in den

Freilandversuchen infolge einer zweimaligen Bakterienbehandlung nach 7 Wochen zu beobachten war. Dies zeigte die grosse Einflussnahme von Begleitbedingungen auf die bakteriellen Wirkungsmöglichkeiten sowie die Vegetationsentwicklung.

Diesbezüglich war der Trend der Wachstumsverbesserung beim Vergleich von Ziegelbruchsubstrat mit Kompost und ohne Kompost spürbar, je mehr Kompost es im Substrat gab. Währenddessen wurden zur Abschlussbonitur die höchsten mittleren Sprosslängen und Triebanzahlen durch die Applikation der *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^9 in allen Substrattypen erreicht. Für das Auftreten und die Nachhaltigkeit der bakteriellen Wirkung scheint jedoch die Bakterienkonzentration und die Substratart eine Rolle zu spielen.

Die Formulierung der *Bacillus subtilis*- Sporensuspension 2×10^9 erwies sich in der Aktivitätsentfaltung auf das Pflanzenwachstum als zeitlich dauerhafter im Vergleich zu der Bakteriensporensuspension 2×10^8 .

Die Ergebnisse vom Nachweistest stimmten deshalb mit den Versuchsergebnissen überein, weil die Versuchsbedingungen in der Klimakammer dieselben waren.

In unseren Untersuchungen zur Wirkung von *B. subtilis* auf die Vegetationsentwicklung war der Einfluss der bakteriellen Applikation substratspezifisch zu bewerten. Für die Wachstumsstimulierung durch eine *Bacillus subtilis*- Applikation war die Abhängigkeit von Substrateigenschaften wie Nährstoffstatus, Feuchtigkeitsgehalt und mikrobielle Aktivität von großer Bedeutung.

Hervorzuheben ist außerdem die Rolle des pH-Wertes und der Temperatureinfluss im Substrat. Es ist jedoch zu vermerken, dass *B. subtilis* unter trockenen Substratbedingungen in Sporenform vorkommt und lange vital bleibt. Höhere Versuchstemperaturen und pH-Werte hatten eine größere Wirkung auf das Pflanzenwachstum zur Folge. Diese so genannten Einflüsse waren im Ziegelbruchsubstrat wesentlich stärker als in den übrigen Substrattypen.

In diesem Sinne kommt auch der Einfluss der Jahreszeit in Betracht. In Sommertrockenperioden waren bereits im Vorfeld bessere und schnellere Wuchsverbesserungen erkennbar als in kalten Winterfeuchtperioden. Es deutet sich damit an, dass die Bakterienapplikation im Sommer effektiver war als deren Applikation im feuchten Winter, da sich die Pflanzen selbst besser an den Trockenstress im Sommer anpassen konnten.

Trotzdem behielt *B. subtilis* einen relativ stabilen, positiven Effekt auf das Pflanzenwachstum nach langfristiger Verweildauer im Substrat, selbst unter feuchten und trockenen Versuchsbedingungen. Dennoch bleiben optimale Kulturführung und geeignete Pflanzenart Grundvoraussetzungen für sinnvolle Wirkungen inokulierter Mikroorganismen.

Die Versuche wiesen darauf hin, dass ein effektiver Einsatz der Nutzbakterien bezüglich der biologischen Wirkung und ökonomischen Akzeptanz nur dann gegeben ist, wenn bei der Wahl der Begrünungssubstrate die elementaren Wachstumsbedingungen für die ausgewählten Pflanzenarten garantiert werden und der Applikationszeitpunkt der Bakterien der Pflanzenentwicklung angepasst wird.

Aus den Versuchsergebnissen ableitend wird also die Qualität des Substrates als die wichtigste Grundlage für eine bessere, gezielte Nutzung des Rhizobakteriums *Bacillus subtilis* anzusehen sein.

Das Ziegelbruchsubstrat bewährte sich zur Begrünung im Gleisbett, da das Vorhandensein von *Bacillus subtilis* für die Pflanzen vorteilhaft war. Aus dieser Feststellung stellt sich das Substrat als kostengünstiges, umweltschonendes Begrünungsverfahren von Gleisbettungen dar. Also unterstützt die Naturierung die Gestaltung, es werden damit sowohl ökonomische, als auch ökologische und gestalterische Aspekte gefördert. Somit lässt sich das Gleisbett dauerhaft und dabei blütenschön begrünen.

Ein zusätzlicher Einfluss der Düngung mit dem 6 Monate Basacote- Mineraldünger bzw. mit dem Komplexdünger Wopil auf die Effektivität der Bakterien und damit auf das Wachstum der Sedumvegetation wurde nicht gefunden.

Der Zusatz des Komposts im Substrat war für das Pflanzenwachstum förderlich. Er ist aber unter den Gleisbettbedingungen nicht unbedingt erforderlich.

Der Gebrauch von nützlichen Milchsäurebakterien als Bodenimpfung zur Steigerung von Wachstum, Gesundheit, Ertrag und Fruchtqualität hat noch keine weit verbreitete Anerkennung in der landwirtschaftlichen Forschung gefunden, weil der schlüssige wissenschaftliche Beweis fehlte. Aus der Literatur geht hervor, dass bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Untersuchungen über Einflüsse einer *Lactobacillus* -Applikation auf das Pflanzenwachstum durchgeführt worden sind. Es war auch nicht bekannt, ob die Stoffwechselleistung der Laktobazillen tatsächlich für die Verbesserung des Pflanzenwachstums unter den gegebenen

Standortbedingungen im Gleisbett verantwortlich sind. Die vorliegenden Ergebnisse können daher als erstmalig bezeichnet werden.

Der verbesserte Zustand der mit dem Nutzbakterium behandelten Pflanzen gegenüber der unbehandelten Kontrolle könnte somit die Hypothese der anderen Untersuchungen bestätigen, bei denen ebenfalls wachstumsstimulierende und stressmindernde Wirkungen einer *Bacillus subtilis*- Applikation erzielt worden waren. Diese stressmindernde und wachstumsfördernde Wirkung von *B. subtilis* hatte in der Regel zur Folge, dass sich Bestände mit z. B. sichtbaren Trocken, Hitze- oder Nässeschäden deutlich rascher erholten als unbehandelte Partien. Sehr positiv zu bewerten war auch ein allgemein stärkeres Regenerationsvermögen und eine deutlich längere Vitalitätsphase behandelter Pflanzen.

Dank der *Bacillus subtilis*- Leistungsfähigkeit, das Wachstum von Pflanzen unter wachsender Umweltbelastung positiv zu beeinflussen, kann in der Zukunft möglicherweise eine natürliche Nutzung von *B. subtilis* für viele Naturfreunde als interessante Alternative zu konventionellen Naturierungs- Methoden im Gleisbett entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- ABOU-SHAAR, M. (1988): Untersuchungen zur Bekämpfung der Tomatenkorkwurzelkrankheit (*Pyrenochaeta lycopersici* Schneider et Gerlach) durch mikrobielle Antagonisten und Erhöhung der Pflanzenresistenz. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- AHMED, E. (1999): Wirkung des Rhizobakteriums *Bacillus subtilis* auf den Befall von Tomatenpflanzen durch Wurzelgallen- (*Meloidogyne* spp.) und Wurzelläsions-Nematoden (*Pratylenchus* spp.). Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- ALEMAYEHU, W. (1997): Untersuchungen über Vorkommen und Bedeutung Auxin- und Cytokinin- aktiver Stoffwechselprodukte bei phytosanitär wirksamen *Bacillus subtilis*-Isolaten. Verl. Kovac, Hamburg. Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertation.
- ALSTRÖM, S. (1987): Influence of root-zone inhabiting bacteria on growth of plants and soil- borne fungal pathogens. In: växtskyddsrapporter-Uppsala 14: 1-40.
- ANONYM (2000): Begrünung einer Gleistrasse In: Neue Landschaft 3: 153-162.
- ARICI, M. (1997): Untersuchungen zum fermentativen Abbau von Patulin mit ausgewählten Milchsäurebakterien aus südeuropäischen fermentierten Lebensmitteln. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe.
- ASAKA, O.; SHODA, M. (1996): Biocontrol of *Rhizoctonia solani* damping-off of tomato with *Bacillus subtilis* RB 14. Appl. Environ. Microbiol. **62** (11): 4081-4085.
- AZIZBEKYAN, R.; KUZIN, A.; NIKOLAENKO, M.; SMIRNOVA, T.; SHAMSHINA, T. (2001): Biological control of plant fungal diseases. IOBC-WPRS Bulletin, **24** (3): 93-95.
- BAI, Y. M.; DAOUST, F.; SMITH, D. L.; DRISCOLL, B. T. (2002): Isolation of plant-growth-promoting *Bacillus subtilis* strains from soyabean root nodules. Can. J. Microbiol. **48** (3): 230-238.
- BAYLISS, C. A.; WAITES, W. M.; KING, N. R. (1981): Resistance und structure of spores of *Bacillus subtilis*. J. Appl. Bacteriol. **50**: 379-390.
- BERGER, F.; LI, H.; WHITE, D.; FRAZER, R.; LEIFERT, C. (1996): Effect of pathogen inoculum, antagonist density and plant species on biological control of *Phytophthora* and *Pythium* damping-off by *Bacillus subtilis* Cot1 in high-humidity fogging glasshouses. J. Phytopathol. **86**: 428-433.

- BOCHOW, H. (1990): Biologischer Pflanzenschutz im Gartenbau: Nutzung von Biotechnologie. Wiss. Z. Humboldt-Universität zu Berlin, **Reihe Agrarwiss. 39**: 159-164.
- BOCHOW, H. (1992): Phytosanitary effects of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent. Intrnational Symposium over Fytofarmacie en Fytiatrie (Belgium). Rijksuniversiteit Faculteit Landbouwwetenschappen, Gent **44** (2): 387-393.
- BOCHOW, H. (1995): Mode of action and practical use of *Bacillus subtilis* as complex acting bioproduct. In: MANKA, M. (Hrsg.): Environmental biotic factors in integrated plant disease control. The Polish Phytopathol. Soc. Poznan, 97-104.
- BOCHOW, H. und DOLEJ, S. (1999): Mechanisms of tolerance induction in plants by root colonizing *Bacillus subtilis*-Isolates. Modern fungicides and antifungal compound II. Intercept LTD, PO Box 716, Andover, Hampshire SP101 Yg, UK, 411-416.
- BOCHOW, H.; JUNGE, H.; STAVROPOULOU, A.; SCHMIEDEKNECHT, G.; EL-SAYED, S. F. (2001): Use of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent. IV. Salt-stress tolerance induction by *Bacillus subtilis* FZB 24 seed treatment in tropical vegetable field crops, and its mode of action. J. Plant Diseases and Protection **108** (1): 21-30.
- BONATERRA, A.; MARIE, M.; CASALINI, L.; MONTESINOS, E. (2003): Biological control of *Monilia laxa* and *Rhizopus stolonifer* in postharvest of stone fruit by *Pantoea agglomerans* EPS125 and potative mechanisms of antagonism. Intern. J. Food Microbiol. **84** (1): 93-104.
- BRANNEN, P. M.; BACKMANN, P. A. (1994): Disease in *Fusarium oxysporum* f.sp. *vasifectum* incidence through use of *Bacillus subtilis* seed inoculants. Proceedings of the Worldwide Cotton Conference. Memphis TN, 1244-1245. In: NEMEC, S.; DATNOFF, L. E.; STRANDBERG, J. (1996).
- BREUNING, J. (1996): Begrünung für eine Gleisanlage. Deutsches Patentamt, DE 296 17 059 U1.
- BROADBENT, P.; BAKER, K. F.; WATERWORTH, Y. (1971): Bacteria and actinomycetes antagonistic to fungal root pathogens in Australian soils. Aust. J. Biol. Sci. **24**: 925-944.
- BROADBENT, P.; BAKER, K. F.; FRANKS, N. M.; HOLLAND, J. (1977): Effect of *Bacillus* spp. on increased growth of seedlings in steamed and in nontreated soil. J. Phytopathol. **67**: 1027-1034.

- Bundesgütegemeinschaft Kompost (1994): Methodenbuch zur Analyse von Kompost. 3. Aufl. Stuttgart, 20-23.
- CHAN, Y. K.; McCORMICK, W. A.; SEIFERT, K. A. (2003): Characterization of an antifungal soil bacterium and its antagonistic activities against *Fusarium* species. *Can. J. Microbiol.* **49** (4): 253-262.
- CHET, I.; ORDENTLICH, A.; SHAPIRA, R.; OPPENHEIM, A. (1990): Mechanisms of biocontrol of soil-borne plant pathogens by rhizobacteria. *Plant Soil* **129**: 85-92.
- CHITARRA, G. S.; BREEUWER, P.; NOUT, M. J. R.; VAN AELST, A. C.; ROMBOUTS, F. M. und ABEE, T. (2003): An antifungal compound produced by *Bacillus subtilis* YM 10-20 inhibits germination of *Penicillium roqueforti* conidiospores. *J. Appl. Microbiol.* **94** (2): 159-166.
- COHN, F. (1872): Untersuchungen über Bakterien. Beiträge zur Biologie der Pflanzen. **1**: 127-222. In: SNEATH, P.H.A.; NICHOLAS, S. M.; SHARPE, M. E.; HOLT, G. J. (Hrsg.) 1986: *BERGEY'S manual of systemic bacteriology*. Williams & Wilkins, Baltimore, 1130.
- DAESCHEL, M. A.; ANDERSON, R. E.; FLEMING, H. P. (1987): Microbial ecology of fermenting plant materials. *FEMS Microbiol. Rev.* **46**: 357-367.
- DAVIS, D. und DIMOND, A. E. (1956): Site of disease resistance induced by plant growth regulators in tomato. *Phytopathol.* **46**: 551-552.
- DEL RIO, J. A.; BAIDEZ, A. G.; BOTIA, J. M.; ORTUNO, A. (2003): Enhancement of phenolic compounds in olive plants (*Olea europaea* L.) and their influence on resistance against *Phytophthora* sp. *Food Chem.* **83** (1): 75-78.
- DOLEJ, S. (1998): Wirkungen von Stoffwechselprodukten des Rhizobakteriums *Bacillus subtilis* (EHRENBERG) COHN im Pathosystem Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill)- *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* Jarvis & Shoemaker. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- DUITMAN, E. H.; HAMOEN, L. W.; REMBOLD, M.; VENEMA, G.; SAENGER, W.; SEITZ, G.; BERNHARD, F.; REINHARDT, R.; SCHMIDT, M.; ULRICH, C.; STEIN, T.; LEENDERS, F.; VATER, J. (1999): The mycosubsubtilinsynthetase of *Bacillus subtilis* ATCC6633: a multifunctional hybrid between a peptide synthetase, an aminotransferase, a fatty acid synthase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **96**: 13294-13299.

- DUNNE, C.; MURPHY, L.; FLYNN, S.; O' MAHONY, L.; O' HALLORAN, S.; FEENEY, M.; MORRISSEY, D.; THORNTON, G.; FITZGERALD, G.; DALY, C.; KIELY, B.; QUIGLEY, E. M.; O' SULLIVAN, G. C.; SHANAHAN, F. & COLLINS, J. K. (1999): Probiotics: from myth to reality. Demonstration of functionality in animal models of disease and in human clinical trials. *Antonie Van Leeuwenhoek* **76**: 279-292.
- EDWARDS, S. G.; SEDDON, B. (2001): Mode of antagonism of *Brevibacillus brevis* against *Botrytis cinerea* in vitro. *J. Appl. Microbiol.* **91** (4): 652-659.
- EHRENBERG, G. (1835): Dritter Beitrag zur Erkenntnis großer in der Richtung des kleinsten Raumes. *Abh. Preuss. Akad. Wiss. Phys. Kl.* In: SNEATH, P.H.A.; NICHOLAS, S. M.; SHARPE, M. E.; HOLT, G. J (Hrsg.) (1986): *Bergey's manual of systemic bacteriology*. Williams & Wilkins, Baltimore. S. 134-336.
- EHRMANN, M. (1994): Klassifizierung und Identifizierung von Milchsäurebakterien mit Hilfe molekularbiologischer Methoden. Dissertation Technische Universität München.
- ESITKEN, A.; KARLIDAG, H.; ERCISLI, S.; SHAHIN, F. (2002): Effects of foliar application of *Bacillus subtilis* Osu-124 on the yield, growth and control of shot-hole disease (*Coryneum blight*) of apricot. *Gartenbauwissenschaft* **67** (4): 139-142.
- FEY, H. (1996): Untersuchungen zum Einsatz phytosanitär wirksamer *Bacillus* spp. Zur Saatgutbehandlung beim Mais. *Mitt. Biol. Bundesanst.* 321: 470.
- FLL (1994): Gütebestimmungen für Stauden. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, Troisdorf.
- FLL (1997): Regelsaatgutmischungen für Rasengräser (RSM). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, Troisdorf.
- FLL (1995): Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, Troisdorf.
- FOSTER, S. J.; JOHNSTONE, K. (1989): The trigger mechanism of bacterial spore germination. In: SMITH, I.; SLEPECCKY, R. A.; SETLOW, P. (Hrsg.): *Regulation of procaryotic development*. Amer. Soc. Microbiol., Washington, D.C. 89-108.
- FRANK, H. K. (1970): Toxinbildende Schimmelpilze. *Confructa* **15**: 68-71.
- FRANKENBERGER, W. T. und ARSHAD, M. (1995): *Phytohormones in soils: microbial production and function*. Marcel Dekker, Inc. New York, 35-78.
- FRAVEL, D. R. (1988): Role of antibiosis in the biocontrol of plant diseases. *Ann. Rev.*

- Phytopathol. **26**: 75-91.
- FRITSCH, W. (1990): Mikrobiologie. Gustav Fischer Verl., Jena.
- FROMMEL, M. L. und LAZAROVITZ, G. (1993): Treatment of potato tubers with growth Promoting *Pseudomonas* sp.: plant growth response and bacterium distribution in the rhizosphere. Plant Soil 150: 51-60.
- FZB (2002): Forschungszentrum für Biotechnologie, Berlin.
- GANTCHEVA, K. (1993): Untersuchungen der Populations- und Aktivitätsdynamik von *Bacillus subtilis* zur biologischen Bekämpfung bodenbürtiger, pilzlicher Pflanzenkrankheiten. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- GROSCH, R.; JUNGE, H.; KREBS, B. und BOCHOW, H. (1999): Use of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent. III. Influence of *Bacillus subtilis* on fungal root diseases and on yield in soilless culture. Z. Pflkrankh. PflSchutz 106: 568-580.
- Gummiwerk Kraiburg Relastec GmbH (2001): Begrünbares Belagmaterial für horizontale Bauwerksflächen und Verfahren zu dessen Herstellung. Deutsches Patent- und Markenamt DE 100 08 021 A1.
- GUPTA, D. K.; VYAS, K. M. (1989): Efficacy of *Bacillus subtilis* against mosquito larvae (*Anophelis culicifacies*). Z. Angew. Zoologie **76**: 85-91.
- GUPTA, V. K. und UTKHEDE, R. S. (1986): Factors affecting the production of antifungal compounds by *Enterobacter aerogenes* and *Bacillus subtilis*, antagonists of *Phytophthora cactorum*. Phytopathol. **117**: 9-16.
- GUCHTE, M, VAN DE.; SERROR, P.; CHERVAUX, C.; SMOKVINA, T.; EHRLICH, S. D.; MAGUIN, E. (2002): Stress responses in lactic acid bacteria. Proceedings of the seventh Symposium on lactic acid bacteria. Antonie Van Leeuwenhoek **82**: 187-216.
- HAIKARA, A; und MATTILA-SANDHOLM, T. (1994): Procedure for Treatment of Seed Material to be Germinated. Intern. Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 94 16053.
- HAIKARA, A.; ULJAS, H. und SUURNÄKKI, A. (1993): Lactic starter cultures in malting—a novel solution to gushing problems. In: Proceedings of the 25th European Brewery Convention Congress, Oslo, Oxford: IRL Press, 163-172.
- HALLMANN, L. und BURKHARDT, F. (1974): Klinische Mikrobiologie. Thieme Verl., Stuttgart.
- HAMDAN, I. Y. und MIKOLAJCIK, E. M. (1974): Acidolin, an antibiotic produced by *Lactobacillus acidophyllus*. J. Antibiotics, **27**: 631-636.

- HAMMERSCHMIDT, R. und KUC, J. (1995): Induced resistance to disease in plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 182.
- HAMMES, W.; BANTLEON, A.; MIN, S. (1990): Lactic acid bacteria in meat fermentation. FEMS Microbiol. Rev. **87**: 165-174.
- HELBIG, J. und BOCHOW, H. (2001): Effectiveness of *Bacillus subtilis* (Isolate 25021) in controlling *Botrytis cinerea* in Strawberry. J. Plant Diseases and Protection. **108** (6): 545-559.
- HELBSING, T. (1987): Die Bedeutung von anatomischen und physiologischen Eigenschaften und ihrer Interaktionen für die Trockenanpassung und ökologische Stabilität bei Sukkulente. Dissertation, Universität Bremen.
- HENTSCHEL, K. D.; BOCHOW, H. (1990): Biologischer Pflanzenschutz gegen bodenbürtige Mykosen durch Einsatz bakterieller Antagonisten beim Gemüsebau im Gewächshaus. Mitt. Biol. Bundesanst. H. 266: 293.
- HENZE, H. J. und RUDOLF, W. (1996): Gleisbett-Naturierung in Berlin, 3: 8-19.
- HIGA, T. (unveröffentlicht): Nützliche und effektive Mikroorganismen für eine dauerhafte Landwirtschaft und eine gesunde Umwelt.
- HOSOI, T.; AMETANI, A.; KIUCHI, K. und KAMINOGAWA, S. (2000): Improved growth and viability of lactobacilli in the presence of *Bacillus subtilis* (*natto*), catalase, or subtilisin. J. Microbiol. **46** (10): 892-897.
- HOSOI, T.; AMETANI, A.; KIUCHI, K. und KAMINOGAWA, S. (1999): Changes in fecal microflora induced by intubation of mice with *Bacillus subtilis* (*natto*) spores are dependent upon dietary components. J. Microbiol. **45** (1): 59-66.
- HWANG, S. F. und CHAKRAVARTY, P. (1992): Potential for the integrated control of *Rhizoctonia root-rot* of *Pisum sativum* using *Bacillus subtilis* and a fungicide. Z. Pflkrankh. Pflschutz **99**: 626-636.
- IDRIS AHMED, E. E. (2002): Investigations of the genetics of plant-growth-promoting Substances Synthesis by *Bacillus subtilis* / *amyloliquefaciens* Strains FZB. -1. Aufl. Verl. Köster, Berlin. Humboldt-Universität zu Berlin, Doktorarbeit.
- ISSOUFFU, I. (2000): Effects of ecological factors on the efficacy of the biological and plant growth-promoting activities of *Bacillus subtilis* (Ehrenberg) Cohn. -1. Aufl. Verl. Köster, Berlin. Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertation.

- JAHN, M. (1998): Untersuchungen zum Einfluss selektierter arbuskulärer Mykorrhizapilze (AMP) und assoziativer Rhizosphärenbakterien einzeln und kombiniert auf das Wachstum und den Zierwert von Zierpflanzen für den urbanen Bereich. Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertation.
- JACOB, F.; JÄGER, E. J.; OHMANN, E. (1981): Kompendium der Botanik. -1. Aufl. Gustav Fischer Verl., Jena, 169-172.
- JACOB, M.; PLIETZSCH, A.; SCHULZE, S. (1991): Ergebnisse aus Modellversuchen zur Bewurzelung von Ziergehölzen. Gartenbau **38** (3): 44 - 46.
- JACOB, M. (1992): Einsatz von *Bacillus subtilis* in der Cyclamenproduktion: Wachstumsstimulierende und phytosanitäre Wirkungen. Gartenbaumagazin **12**: 58-61.
- JACOB, M und HAMDAN, I. (1992): Bewurzelungserfolge bei Stecklingen von Edelnelken. Gartenbaumagazin **8**: 62-63.
- JACOB, M und HAMDAN, I. (1992): Einsatz bakterieller Nutzorganismen bei *Pelargonium Zonale*. Gartenbaumagazin **3**: 105-107.
- JAMAL, E. (1993): Untersuchungen zur Pflanzenschutzwirkung von *Bacillus subtilis* (EHRENBERG) COHN und beeinflussende Faktoren gegenüber dem Möhrenscharzfäuleerreger *Alternaria radicina* (MEIER et al.). Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- JUNGE, H.; KREBS, B.; KILIAN, M. (2001): Strain selection, production, and formulation of the biological plant vitality enhancing agent FZB24®-*Bacillus subtilis*. Pflanzenschutznachrichten Bayer **1**, 94-104.
- KANEDA, M. und KAJIMURA, Y. (2002): New antifungal antibiotics, bacillopeptins and fusaricidins. Yacugaku Zasshi-journal of the Pharmaceutical society of Japan **122** (9): 651-671.
- KATZNELSON, H. und COLE, S. E. (1965): Production of giberellin-like substances by bacteria and actinomycetes. Can. J. Microbiol. **11**: 733-741.
- KLOEPPER, J. W.; LIFSHITZ, R.; ZABLOTOWICZ, R. M. (1989): Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. Trends Biotechnol. **7**: 39- 44.
- KLOEPPER, J. W.; RODRIGUEZ-KABANA, R.; MCINROY, J. A.; COLLINS, D. J. (1991): Analysis of population and physiological characterization of microorganisms in rhizospheres of plants with antagonistic properties to phytopathogenic nematodes. Plant Soil **136**: 95-102.

- KEHLENBECK, H.; KRONE, C.; SCHÖNBECK, F. (1992): Zum Einfluss induzierter Resistenz auf die Physiologie der Ertragsbildung bei Mehltau befallener Wintergerste. Mitt. Biol. Bundesanst. 183: 241.
- KEGLER, H. (1993): Zur antiphytoviralen Wirkung eines Isolates von *Bacillus subtilis*. Arch. Phytopathol. Pflschutz, **28**: 115-124.
- KILIAN, M.; JUNGE, H.; STEINER, U.; KRIEG, U. (1998): Einfluss von Umweltfaktoren auf die ertragssteigernde Wirkung von FZB 24 *Bacillus subtilis* bei Kartoffeln. Mitt. Biol. Bundesanst. 357: 361.
- KILIAN, M.; STEINER, U.; KREBS, B.; JUNGE, H.; SCHMIEDEKNECHT, G.; HAIN, R. (2000): FZB24 *Bacillus subtilis*- mode of a microbial agent enhancing plant vitality. Pflanzenschutznachrichten Bayer, **53** (1): 72-93.
- KLEINER, E. (1985): Winterharte Sukkulente: Kakteen, Hauswurz, Mauerpfeffer. - Kosmos Franckh, Stuttgart, 53-54.
- KNOTT, A. G.; RUSSEL, A. D.; DANCER, B. N. (1995): Development or resistance to biocides during sporulation of *Bacillus subtilis*. J. Appl. Bacteriol. **79** (5): 492-498.
- KNOX, O. G. G.; KILLHAM, K.; LEIFERT, C. (2000): Effects of increased nitrate availability on the control of plant pathogenic fungi by the soil bacterium *Bacillus subtilis*. Appl. Soil Ecology **15**, 227-231.
- KOCH, E. (2001): Effect of biocontrol agents on plant growth in the absence of pathogens. IOBC-WPRS Bulletin, **24** (1): 81-89.
- KOLB, W. und SCHWARZ, T. (1999): Dachbegrünung. Intensiv und extensiv, Ulmer Verl., Stuttgart (Hohenheim), 55-57.
- KONDOH, M.; HIRAI, M.; SHODA, M. (2001): Integrated biological and chemical control of damping-off caused by *Rhizoctonia solani* using *Bacillus subtilis* RB14-C and flutolanil. J. Biosci. Bioengin. **91** (2): 173-177.
- KOSTANTINOVA, T.; PARVANOV, D.; ATANASSOV, A.; DJILIANOV, D. (2002): Freezing tolerant tobacco, transformed to accumulate osmoprotectants. Plant Science **163** (1): 157-164.
- KRAMER, E.; RUDOLF, W.; SIEMSEN, M. (1998): Vegetation im Gleisbett. Humboldt-Spektrum 3: 56-62.
- KRUPKA, B. (1992): Dachbegrünung. Pflanzen- und Vegetationsanwendung an Bauwerken. Ulmer Verl., Stuttgart, 299-302.

- KRUPKA, B. (1984): Standortfaktoren, Pflanzen und Vegetationsformen für extensive Dachbegrünungen. *Das Gartenamt*. **33** (12): 814-822.
- KRASKA, T.; BRAUL, H. J.; SCHÖNBECK, F. (1992): Einfluss der induzierten Resistenz auf die Proteinbiosynthese und die Chromatinstruktur. *Mitt. Biol. Bundesanst.* 283: 242.
- KREBS, B.; OCKHARDT, A.; HOEDING, B.; BENDZKO, P.; MAXIMOV, J.; ETZEL, W. (1996): Cyclic peptides from *Bacillus amyloliquefaciens* useful antimycotics, antivirales, fungicides, nematicides etc., DE 19641213.
- KREBS, B.; HÖDING, B.; KÜBART, S.; ALEMAYEHU WORKIE, M.; JUNGE, H.; SCHMIEDEKNECHT, G.; GROSCHE, R.; BOCHOW, H.; HEVESI, M. (1998): Use of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent. I. Activities and characterisation of *Bacillus subtilis* strains. *Z. Pflkrankh. Pflschutz* **105** (2): 181-197.
- KRISP, A. (2002): Analyse der Induktion der generellen Stressantwort von *Bacillus subtilis* während des Wachstums bei niedriger Temperatur- Charakterisierung der Interaktionen von RsbW mit SigB und RsbV. Dissertation, Universität Marburg.
- LARCHER, W. (1985): Kälte und Frost. In: Sorauer, P., *Handbuch der Pflanzenkrankheiten*, **Part 5, 7th edition**, Verl. Paul Parey, Berlin, **1**: 69-320.
- LAITILA, A.; ALAKOMI, H. L.; RASSKA, L.; MATTILA-SANDHOLM, T.; HAIKARA, A. (2002): Antifungal activities of two *Lactobacillus plantarum* strains against *Fusarium moulds* in vitro and in malting of barley. *J. Appl. Microbiol.*, **93** (4): 566-576.
- LEEMAN, M.; DEN OUDEN, F. M.; VAN PELT, J. A.; DIRKS, B. M.; STEIJL, H. (1996): Iron availability affects induction of systemic resistance to fusarium wilt of radish by *Pseudomonas fluorescence*. *J. Phytopathol.* **86**: 149-156.
- LEHMANN, H. (2000): *Bacillus subtilis*-Einsatz in Forstbaumschulen zur Verbesserung der Vitalität und Vegetationsleistung bei Eichensämlingen. Mitteilung Pflanzenschutzdienst, Landesamt für Ernährung und Landwirtschaft Frankfurt (Oder).
- LIESECKE, H.-J. (1984): Extensivbegrünungen auf Dächern. Problemstellung und Entwicklung, allgemeine Anforderungen an Bodenaufbau und Pflanzen sowie Verfahren des Begrünens. *Das Gartenamt* **33** (2): 71-82.
- LIESECKE, H.-J. (1985): Ausstreuen von Sedumsprossen mit Zusaaten zur extensiven Begrünung von Flachdächern. *Z. Vegetationstechnik* **8** (4): 159-165.

- LIESECKE, H.-J.; KRUPKA, B.; LÖSKEN, G.; BRÜGGEMANN, H. (1989): Grundlagen der Dachbegrünung: Zur Planung, Ausführung und Unterhaltung von Extensivbegrünungen und einfachen Intensivbegrünungen, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. -1. Aufl. Patzer Verl., Berlin, 20-30, 170-172.
- LI, J.; OVAKIM, D. H.; CHARLES, T. C. und GLICK, B. R. (2000): An ACC deaminase minus mutant of *Enterobacter cloacae* UW4 no longer promotes root elongation. *Current Microbiol.* **41**: 101-105.
- LEVITT, J. (1980): Responses of plants to environmental stresses. 2nd edition New York, N. Y., USA, Academic Press, **Bd. 2**. Water, radiation, salt, and other stresses. In: HELBSING, T., Dissertation (1987).
- LINDGREN, S. E. und DOBROGOSZ, W. J. (1990): Antagonistic activities of lactic acid bacteria in food and feed fermentations. *FEMS Microbiol.* 78: 149-164.
- LINDROTH, S. (1980): Occurrence, formation and detoxification of patulin mycotoxin. Technical Research Center of Finland, Material and Processing Technology, Publication 24.
- LOEFFLER, W.; KATZER, W.; KREMER, S.; KUGLER, M.; PETERSEN, F.; JUNGE, G.; RAPP, C.; TSCHEN, J. S.-M. (1990): Gegen Pilze wirksame Antibiotika der *Bacillus subtilis*-Gruppe. *Forum Mikrobiol.* **13**: 156-163.
- LUNG, C. (2000): Pflanzenschutz im Rasen- Neue Behandlungsmethode, Rhizosphärenbewohnende Mikroorganismen als Antagonisten (biologische Gegenspieler) von pflanzenparasitären Pilzen (Endophytes). *Garten und Landschaft Galabau* 34: 35-37.
- MAISS, E. (1987): Einsatz einer Resistenzinduktion durch Kulturfiltrate von *Stachybotrys chartarum* (EHRENB. EX LINK) HUGHES und *Bacillus subtilis* (EHRENBERG) COHN gegen Viren unter praxisüblichen Anbaubedingungen. *Arch. Phytopathol. Pflschutz* **23**: 275-283.
- MANJULA, K. und PODILE, A. R. (2001): Chitin-supplemented formulations improve biocontrol and plant growth promoting efficiency of *Bacillus subtilis* AF1. *Can. J. Microbiol.* **47** (7): 618-625.
- MARSILIO, V. und LANZA, B. (1998): Characterisation of an oleuropein degrading strain of *Lactobacillus plantarum*. Combined effects of compounds present in olive fermenting

- brines (phenols, glucose and NaCl) on bacterial activity. J. Sci. Food and Agriculture, **76**: 520-524.
- MARTIN, N. I.; HU, H. J.; MOAKE, M. M.; CHURY, J. J.; WHITTAL, R.; WOROBO, R. W.; VEDERAS, J. C. (2003): Isolation, structural characterization, and properties of mactacin (*Polymyxin M*), a cyclic peptide antibiotic produced by *Paenibacillus kobensis* M. J. Biol. Chem. **278** (15): 13124-13132.
- MAUSETH, J. D. (2000): Theoretical Aspects of Surface-to-Volumen and Water Storage Capacities of Succulents Shoots. Amer. J. Bot. **87** (8): 1107-1115.
- MERCENIER, A.; MULLER-ALOUF, H.; GRANGETTE, C. (2000): Lactic acid bacteria as live vaccines. Curr. Issues Mol. Biol. 2: 17-25.
- MEYER, G und HÖFTE, M. (1997): Salicylic Acid produced by Rhizobacterium *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2 induces resistance to leaf infection by *Botrytis cineria* on bean. J. Phytopathol. **87**: 588-593.
- MIYAMOTO, T.; MORINAKA, O.; MATSUMOTO, H.; KATAOKA, K.; MOK, J. S. (1998): Isolation and Antibacterial Properties of Lactic Acid Bacteria Exhibiting Antagonistic Effects against Food Spoilage Bacteria. In: Scientific Reports of the Faculty of agriculture Okayama University (Japan). **87**: 163-167.
- MÜLLER, G. (1965): Bodenbiologie, Gustav Fischer Verl., Jena.
- MÜLLER, G. (1980): Mikrobiologie, Gustav Fischer Verl., Jena.
- MÜLLER, D. (1982): Immunologische Untersuchungen an phosphoenolpyruvat-Carboxylasen- aus CAM-Pflanzen der Gattungen *Sedum* und *Kalanchoe*. Dissertation-FG. Biologie der Technischen Hochschule Darmstadt.
- MÜLLER, T.; BEHRENDT, U.; MÜLLER, M. (1996): Antagonistic activity in plant-associated lactic acid bacteria. Microbiol. Res. **151** (1): 63-70.
- MUNDT, J. O. und HAMMER, J. L. (1968): Lactobacilli on plants. Appl. Microbiol. **16**: 1326-1330.
- MUNDT, J. O. (1970): Lactic acid bacteria associated with raw plant food material, Presented at a seminar on spoilage bacteria, indicator organisms, and pathogens in raw plant foods at the 70th Annual Meeting of the American Society for Microbiology, Boston, Massachusetts, April 26 - May 1, 550-553.
- MUNIMBAZI, C. und BULLERMAN, L. B. (1998): Isolation and partial characterization of antifungal metabolites of *B. pumilus*. J. Appl. Microbiol. **84**: 959-968.

- MURPHY, J. F.; REDDY, M. S.; RYU, C. M.; KLOEPPER, J. W.; LI, R. H. (2003): Rhizobacteria-mediated growth promotion of tomato leads to protection against Cucumber mosaic Virus. *Phytopathol.* **93** (10): 1301-1307.
- NEMEC, S.; DATNOFF, L. E.; STRANDBERG, J. (1996): Efficacy of biocontrol agents in planting mixes to colonize plant roots and control root diseases of vegetables and citrus. *Crop Protection* **15** (8): 735-742.
- NAUTILYAL, C. S.; BHADARIA, S.; KUMAR, P.; LAL, H.; MONDAL, R.; VERMA, D. (2000): Stress induced phosphate solubilization in bacteria isolated from alkaline soils. *FEMS Microbiol. Lett.* **182**: 291-296.
- NEWMANN, M. A.; DANIELS, M. J.; DOW, J. M. (1995): Lipopolysaccharide from *Xanthomonas campestris* induces defence related gene expression in *Brassica campestris*. *Mol. Plant/Microbe Interact.* **8**: 778-780.
- NOVIKOVA, I. I.; LITVINENKO, A. L.; BOIKOVA, I. V.; YAROSHENKO, V. A.; KALKO, K. V. (2003): Biological activity of new microbiological preparations Alirins B and S designed for plant protection against diseases. I. Biological activity of Alirins against diseases of vegetable crops and potato. *J. Mikol. Fitopatol.* **37** (1): 92-98.
- OBIEGLO, U.; KREBS, B.; JUNGE, H. (1990): Einsatz mikrobieller Antagonisten gegen die Fusarium-Welke der Edelnelke (*Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi*) in hydroponischen Kulturverfahren. *Nachrichtenbl. Pflschut. DDR* **44**: 169-171.
- OBIEGLO, U. (1990): Untersuchungen zum Einsatz mikrobieller Antagonisten und deren Kombination mit fungiziden Wirkstoffen gegen die Fusarium-Welke der Edelnelke (*Fusarium oxysporum* sch. f.sp. *dianthi* (Prill et Del.) Synd. et. Hans.) auf Nichterdesubstraten. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- OBIEGLO, U. (1992): Biocontrol experiments with *Bacillus subtilis* during the rooting period of carnation cuttings under commercial conditions. *WPRS / SROP Bulletin* **15** (1): 127-129.
- OHLWEIN, K. (1984): Dachbegrünung: ökologisch und funktionsgerecht, biologische und technische Grundlagen- bauphysikalische Auswirkungen- Aufbausysteme. Bauer-Verl., Wiesbaden, Berlin, 40-43.
- ORTWEIN, H. (1991): Verfahren zur Herstellung eines Vegetationsaufbaus. Deutsches Patentamt, DE 39 36 067 A1
- ORLA-JENSEN, S. (1919): The lactic acid bacteria. Copenhagen, Host & Son.

- OUWEHAND, A. C. (1998): Antimicrobial components from lactic acid bacteria. In: Lactic Acid Bacteria Microbiology and Functional Aspects ed. SALMINEN, S. and VON WRIGHT, A. New York, Marcel Dekker, 139-159..
- PARRY, J. M.; TURNBULL, P. C. B.; GIBSON, J. R. (1986): Farbatlas der *Bacillus*-Arten, Anleitung zur Diagnose. Schober Verl.- GmbH, Hengersberg. In: AHMED, E., Dissertation (1999).
- PHILIPP, W. D. (1988): Biologische Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten. Ulmer Verl., Stuttgart. In: GANTCHEVA, K., Dissertation (1993).
- PIETSCH, J. und KAMIETH, H. (1991): Stadtböden: Entwicklungen, Belastungen, Bewertung und Planung. E. Blottner Verl., Taunusstein. In: JAHN, M., Dissertation (1998).
- PLIETZSCH, A.; GLÜCK, A.; JESCH, H.-H. (1994): Einsatz mikrobieller Antagonisten (*Bacillus subtilis*) bei der Stecklingsvermehrung von Gehölzen. Deutsche Baumschule 3: 106-107.
- PLIETZSCH, A. (o): Zur Wirkung mikrobieller Antagonisten (*Bacillus subtilis*) auf die Adventivwurzelbildung von Gehölzen, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Schriftenreihe des Fachgebietes Vermehrungstechnologie/ Baumschulwesen Nr. 5: 36.
- PODILE, A. R. und PRAKASH, A. P. (1996): Analysis and biological control of *Aspergillus niger* by *Bacillus subtilis* AF 1. Can. J. Microbiol. **42** (6): 533-538.
- PODILE, A. R. (1996): Plant growth- promoting rhizobacteria newsletter. Notes from the world of PGPR 15: 3. In: AHMED, E., Dissertation (1999).
- PODILE; R. und LAMI, V. D. V. (1998): Seed bacterization with *Bacillus subtilis* AF1 increases phenylalanine ammonia-lyase and reduces the incidence of fusarial wilt in pigeonpea. J. Phytopathol. **146**: 255-259.
- RACKE, J. und SIKORA, R. A. (1985): Einfluss von Rhizosphärenbakterien auf *Rhizoctonia solani* und den Befall der Kartoffelsorte Hansa mit *Globodera solani*. Votr. Pflanzenzüchtg. 9: 21-28.
- RAUH, W. (1979): Die großartige Welt der Sukkulanten -2. Aufl., Paul Parey Verl., – Berlin und Hamburg, 144-146.

- REDDY, M. S. und RAHE, J. E. (1989): Growth effects associated with seed bacterization not correlated with populations of *Bacillus subtilis* inoculated in onion seedling rhizospheres Soil. Biol. Biochem. **21**: 373-378.
- RICHARDSON, A. E.; P. A. HADOBAS; J. E. HAYES; OHARA, J. E. und SIMPSON, R. J. (2001): Utilization of phosphorous by pasture plants supplied with myo- inositol hexaphosphate is enhanced by the presence of soil micro-organisms. Plant Soil. **229**: 47-56.
- ROSSALL, S. und McKNIGHT, S. E. (1991): Some effects of *Bacillus subtilis* (MBI 600) on the development of cotton and peanut. The second international workshop on plant growth promoting rhizobacteria, Interlaken, Switzerland, October 14-19,1990. WPRS Bulletin SROP, XIV, 8: 88-92.
- ROZYCKI, H.; DAHM, H.; STREZELZYK, E. und LI, C. Y. (1999): Diazotrophic bacteria in root free soil and in the root zone of pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L.). Appl. Soil Ecol. 5: 29-56.
- ROOS, S. und JONSSON, H. (1999): The adhesion of *Lactobacillus reuteri* to mucus is mediated by a very large, repetitive cell surface protein. Doktorsexamen, Department of Microbiology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- RYTTER, J. L.; LUKEZIC, F. L.; CRAIG, R.; MOORMAN, G.W. (1989): Biological control of geranium rust by *Bacillus subtilis*. Phytopathol. **79**: 367-370.
- RYU, C. M.; FARAG, M. A.; HU, C. H.; REDDY, M. S.; WEI, H. X.; KLOEPPER, J. W.; PARE, P. W. (2003): Bacterial volatiles promote growth in Arabidopsis. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **100** (8): 4927-4932.
- SALMINEN, S. und VON WRIGHT, A. (1998): Lactic Acid Bacteria Microbiology and Functional Aspects. New York, Marcel Dekker. In: LAITILA, A.; ALAKOMI, H. L.; RASSKA, L.; MATTILA-SANDHOLM, T.; HAIKARA, A. (2002).
- SEMBDNER, G.; SCHNEIDER, G.; SCHREIBER, K. (1998): Methods for plant -hormone Analysis. Gustav Fischer Verl., Jena. In: IDRIS AHMED, E. E., Dissertation (2002).
- SHARPE, M. E. und PETTIPHER, G. L. (1983): Food spoilage by lactic acid bacteria. In: Food Microbiol. Academic Press, London, 199-223.
- SCHIFFRIN, E. J. und BLUM, S. (2001): Food processing: probiotic microorganisms for beneficial foods. Curr. Opin. Biotechnol. **12**: 499-502.

- SCHADE, CH. (2000): Grüne Gleise sind im Kommen. In: Stadt und Grün **2**: 110-111.
- SCHENCK, N. C. (1991): Methods and Principles of Mycorrhizal Research. ASP Press, The American Phytopathological Society, St. Paul. In: JAHN, M., Dissertation (1998).
- SCHIPPERS, B.; BAKKER, A.W.; BAKKER, P. A. H. M. (1987): Interactions of deleterious and beneficial rhizosphere microorganisms and the effect of cropping practices. In: Ann. Rev. Phytopathol. **25**: 339-358.
- SCHLEGEL, H. G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. 7. Aufl., Thieme Verl., Stuttgart; New York 634.
- SCHLEIFER, K. H. (1987): Recent changes in the taxonomy of lactic acid bacteria. FEMS Microbiol. Rev. **46**: 201-203.
- SCHMIEDKNECHT, G. (1990): Antagonistische Wechselwirkungen der Mikroflora des Bodens gegenüber Schaderregern der Kartoffel, insbesondere *Rhizoctonia solani* KÜHN. Akad. Landw.- Wiss. DDR, Dissertation A.
- SCHMIEDEKNECHT, G. (1993): Biologische Bekämpfung von *Rhizoctonia solani* KÜHN an Kartoffeln durch mikrobielle Antagonisten. Arch. Phytopathol. Pflschutz **28**: 311-320.
- SCHMIEDEKNECHT, G.; JUNGE, H. und BOCHOW, H. (1995): Biologische Bekämpfung bakterieller und pilzlicher Erkrankungen bei Kartoffeln. Phytomedizin **25** (3): 32-33.
- SCHMIEDEKNECHT, G.; BOCHOW, H.; JUNGE, H. (1996): Biologischer Pflanzenschutz bei Kartoffeln. Mitt. Biol. Bundesanst. 321: 467.
- SCHMIEDEKNECHT, G.; ISSOUFOU, I.; JUNGE, H.; BOCHOW, H. (2001): Use of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent. V. Biological control of diseases on maize and sunflowers. J. Plant Diseases and Protection **108** (5): 500-512.
- SCHRÖDER, H und BAUMANN, G. (1991): Mikrobiologie: Ein Studienbuch für Lehrer. 1. Aufl., Berlin, Volk u. Wissen. 320.
- SCHUBER, M. (1983): Über den Crassulaceen-Säurestoffwechsel (CAM) bei *Sempervivum*-Arten und einer *Sedum*-Art. Fachbereich der Biologie der Technischen Hochschule Darmstadt, Dissertation.
- SENDL, A. (1992): Chemisch-Analytische und pharmakologische Untersuchungen von *Allium ursinum* L. und *Sedum telephium* L. Dissertation der Fakultät für Chemie und Pharmazie der Ludwig-Maximilians-Universität, München.

- SHISHIDO, M., MASSICOTE, H. B. und CHANWAY, C. P. (1996): Effect of Plant Growth Promoting *Bacillus Strains* on Pine and Spruce Seedling Growth and Mycorrhizal Infection. *Ann. Bot.* **77**: 433-442.
- SIDDIQUI, Z. und MAHMOOD, I. (1995): Biological control of *Heterodera cajani* and *Fusarium udum* by *Bacillus subtilis*, *Bradyrhizobium japonicum* and *Glomus fasciculatum* on pigeon pea. *Fund, Appl. Nematology* **18** (6): 559-566.
- SIDDIQUI, I. A.; EHETSHAMUL-HAQUE, S.; SHAUKAT, S. S. (2001): Use of rhizobacteria in the control of root rot-root knot disease complex of mungbean. *J. Phytopathol.* **149** (6): 337-346.
- SILVA, A. A.; und MORRELL, J. J. (1998): Inhibition of wood-staining *Ophiostoma picea* by *Bacillus subtilis* on *Pinus ponderosa* sapwood. *Material und Organismen*, **32** (4): 241-252.
- SIEMSEN, M. (2002): Anspritzverfahren- eine Begrünungsmethode auch fürs Gleisbett. In: News letter der Forschungspartner Projekt LERM 1.
- SINGLAIR, J. B. (1989): *Bacillus subtilis* as a biocontrol agent for plant diseases. In: AGRIHOTRI, V. P.; SINGH, N.; CHAUBE, H. S.; SINGH, U. S.; DWIVEDI, T. S. (Hrsg.): *Prospectives in plant pathology. Today and Tomorrow's printers and publishers*, New Delhi, 367-374.
- SONENSHEIN, A. L.; HOCH, J. A.; LOSICK, R. (1993): *Bacillus subtilis* and other grampositive Bacteria: biochemistry, physiology, and molecular genetics. *Amer. Soc. Microbiol.*, Washington, 65-66.
- SRIVASTAVA, R. P.; NYAK, P.; NAIK, G. (1990): Pathogenicity of *Bacillus subtilis* (EHRENBERG) COHN on lepidoptera pests of rice (Abstr.). *Biocontrol News Information* **11** (3): 230.
- STEINER, U.; OERKE, E. C.; SCHÖNBECK, F. (1988): Zur Wirksamkeit der induzierten Resistenz unter praktischen Anbaubedingungen IV. Befall und Ertrag von Wintergerstensorten mit induzierter Resistenz und nach Fungizidbehandlung. *Z. Pflkrankh. Pflschutz* **95**: 506-517.
- STEINER, U. (1990): Charakterisierung der biologisch aktiven Komponenten des Resistenzes induzierenden Kulturfiltrates von *Bacillus subtilis*. *Mitt. Biol. Bundesanst.* 226: 292.

- STEENHOUDT, O. und VANDERLEYDEN, J. (2000): *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium closely associated with grasses. Genetic, biochemical and ecological aspects. FEMS Microbiol. Rev. **24**: 487-506.
- STELLER, S.; VOLLENBROICH, D.; LEENDERS, F.; STEIN, T.; CONRAD, B., HOFEMEISTER, J.; JACQUES, P.; THONART, P. und VATER, J. (1999): Structural and functional organization of the fengycin synthetase multienzyme system from *Bacillus subtilis* b213 and A1/3. Chem. Biol. **6**: 31-41.
- STILES, E. M. (1996): Biopreservation by lactic acid bacteria. Antonie Van Leeuwenhoek **70**: 331-345.
- STRASBURGER, E.; NOLL, F.; SCHENK, H.; SCHIMPER, A. F. W. (2002): Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. -35. Aufl. Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg; Berlin.
- STROTZ, G. und HENGGE-ARONIS, R. (Hrsg.). (2000): Bacterial Stress Responses. ASM Press, Washington, DC, 485.
- TANG, W. H. (1994): Yield –increasing Bacteria (YIB) and biocontrol of sheat blight of rice. In: Improving plant productivity with Rhizosphere Bacteria. CSIRO Division of soils, Glen Osmond, Ryder, M. H. et al. (Hrsg.), 267-273.
- TAPIA SILVA, O. F. (2002): Rechner-, modell- und messwertgestützte Untersuchungen in urbanen Teilräumen Berlins zur Verdunstungsmodellierung unter Berücksichtigung von Gleisbett- Naturierungen. Fortschritt-Berichte VDI Verl., Dissertation, Berlin.
- TEERI, J. R.; STOWE, L.G.; MURAWSKI, D. A. (1978): The climatology of two succulent families: Cactaceae and Crassulaceae. Can. J. Bot. **56**: 1750-1758.
- TEUBER, M. (1993): Lactic Acid Bacteria. In: Biotechnology, Rehm H. J. and Reed G., (Hrsg.), 2nd edition, VCH Verlagsgemeinschaft, Weinheim, BRD, 326-366.
- THIMANN, K.V. (1964): Das Leben der Bakterien, Gustav Fischer Verl., Jena.
- TURNER, J. T. und BACKMAN, P. A. (1991): Factors relating to peanut yield increases after seed treatment with *Bacillus subtilis*. Plant Disease **75** (4): 347-353.
- VDLUFA, Methodenbuch Bd.1 (1991): Die Untersuchung von Böden. -4. Aufl., Darmstadt.
- VAN LOON, L. C. und VAN STRIEN, E. A. (1999): The families of pathogenesis related proteins, their activities and comparative analysis of PR-1 type proteins. Physiol. Mol. Plant Pathol. **55**: 85-97.

- VIRGEN-CALLEROS, G.; OLALDE-PORTUGAL, V.; RACHA-R, R.; CINVESTAV-IPN, U.; INIFAP-CAE-BAJIO, C. (1996): Biological and chemical control of *Rhizoctonia solani* on potato in Guanajuata Mexico. *Phytopathol.* **86** (11): 118.
- WANDKE, H. und BOCHOW, H. (1992): Wirkung von *Bacillus subtilis* und *Streptomyces* sp. In einer hydroponischen Tomatenkultur auf Pflanzenwachstum und Unterdrückung von *Phytophthora nicotiana* var. *nicotianae*. *Mitt. Biol. Bundesanst.* 283: 392
- WELLES, J. M.; ROBINSON, K.; CHAMBERLAIN, L. M.; SCHOFIELD, K. M.; LE PAGE, R. W. (1996): Lactic acid bacteria as vaccine delivery vehicles. *Antonie Van Leeuwenhoek* **70**: 317-330.
- ZASPEL, I. (1992): Studies on the influence of antagonistic rhizosphere bacteria on winter wheat attacked by *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Bulletin OILB/SROP* **15** (1): 142-144.
- ZHANG, X. J.; WU, A. M.; WANG, J. S. (1995): Mechanisms of B2 (*Bacillus subtilis*) on controlling to *Sclerotinia* blight of rape. *Eur. J. Plant Pathol.* XIII Int. Plant protection Congress, the Hague- the Netherlands 2. –7. July, Kluwer Academic publisher, Abstract No. 578.
- ZIMMER, J. (2003): Zur Populations- und Aktivitätsdynamik des nützlichen Rhizobakteriums *Bacillus subtilis* (Ehrenberg) Cohn nach Introduction in natürliche Systeme von Pflanze und Boden. Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertation.
- ZUBER, P.; NAKANO, M. M. und MARAHIEL, M. A. (1993): Peptide Antibiotics. In: *Bacillus subtilis* and other gram-positive Bacteria: Biochemistry, Physiology, and Molecular Genetics ed. Sonenshein, A. L., Hoch, J. A. und Losick, R. (Hrsg.), 897-916. Washington, D.C. Amer. Soc. Microbiol.

Weitere Quellen:

- BOCHOW, H. (1998): Persönliche Mitteilungen, FG Phytomedizin / Angewandte Entomologie, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin.
- GORBATSCHEVSKAJA, O. (2003): Persönliche Mitteilungen, IASP, Humboldt-Universität zu Berlin.

- HENTSCHEL, K. D. (1985): Persönliche Mitteilungen, FG Phytomedizin, Humboldt-Universität zu Berlin.
- HENTSCHEL, K. D. (1997, 2003): Mündliche Mitteilungen, FG Phytomedizin, Humboldt-Universität zu Berlin.
- HENTSCHEL, K. D. (2004): Persönliche Mitteilungen, FG Phytomedizin, Humboldt-Universität zu Berlin.
- HENZE, H. -J. (2003): Mündliche Mitteilungen, IASP, Humboldt-Universität zu Berlin.
- PLIETZSCH, A. (1996, 1997): Mündliche Mitteilungen, FG Vermehrungstechnologie, Humboldt-Universität zu Berlin.
- SIEMSEN, M. (2003): Mündliche Mitteilungen, IASP, Humboldt-Universität zu Berlin.

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abb. 1: Wechselbeziehungen zwischen der Sedumvegetation und dem Gleisbett	11
Abb. 2: Wirkmechanismen von <i>Bacillus subtilis</i> (KILIAN et al. 2000)	15
Abb. 3: Räumliche Anordnung des Versuches (2003).	42
Abb. 4: System-Aufbau des Naturierungsverfahrens (SIEMSEN 2002)	46
Abb. 5: Vegetationssystem des Ziegelbruchsubstrats (Querschnittsgestaltung)	51
Abb. 6: Vegetationssystem der Geotextilmatten (Querschnittsgestaltung)	51
Abb. 7: Vegetationssystem der Mineralwollmatten (Querschnittsgestaltung)	51
Abb. 8: Versuchsanlage im Mai 2003	54
Abb. 9: Entwicklungszustand der Sedumvegetation im Juli 2003	58
Abb. 10: Entwicklungszustand der Sedumvegetation zum Versuchsabschluss im September 2003	71

Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tab. 1: Geeignete Pflanzen für die Gleisbett-Naturierungen (KRAMER et al. 1998)	6
Tab. 2: Laboranalysenwerte der verwendeten Substrattypen	36
Tab. 3: Bestandteile der verwendeten Anspritzmasse	38
Tab. 4: Einsatzmengen von Bakterien und Nährsubstrat	39
Tab. 5: Aufwandmengen der verwendeten <i>Sedum</i> -Arten	45
Tab. 6: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten in München	47
Tab. 7: Wachstumsbeeinflussungen durch eine einmalige Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> im Münchener Versuch	48
Tab. 8: Darstellung des Aufbausystems	50
Tab. 9: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten im Komplexfeldversuch	53
Tab. 10: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat und Geotextilmatten, 1. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin	55
Tab. 11: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Mineralwollmatten, 1. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin	57
Tab. 12: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat und Geotextilmatten, 2. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin	59
Tab. 13: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Mineralwollmatten, 2. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin	63
Tab. 14: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat, Mineralwollmatten, 3. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin	64
Tab. 15: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Geotextilmatten, 3. Bonitur im Komplexfeldversuch Berlin	66
Tab. 16: Relativwerte (in %) zum Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Mineralwollmatten (Komplexfeldversuch Berlin)	68
Tab. 17: Relativwerte für Sprosslängen sowie Spross- und Wurzelfrischmassen im	

Keimtest mit Erbsen	74
Tab. 18: Relativwerte für Sprosslängen sowie Spross- und Wurzelfrischmassen im Röhrchentest mit Erbsen	77
Tab. 19: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten in Versuchsserie 3	81
Tab. 20: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompost substrat, 1. Bonitur in Versuchsserie 3 (Herbst / Winter)	82
Tab. 21: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompostsubstrat, 2. Bonitur in Versuchsserie 3 (Herbst / Winter)	84
Tab. 22: Relativwerte des Bedeckungsgrades (in %) in Abhängigkeit von der Behandlung mit <i>Bacillus subtilis</i> und <i>Lactobacillus</i> auf Ziegelbruchsubstrat, Geotextilmatten und Ziegelkompostsubstrat (Versuchsserie 3)	86
Tab. 23: Relativwerte für Sprossfrischmassen im Keimtest mit Sommergerste	90
Tab. 24: Aufwandmengen an Substraten	92
Tab. 25: Behandlungsvarianten in Kombination mit Substraten im Klimakammerversuch	94
Tab. 26: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, 1. Bonitur in der Klimakammer	95
Tab. 27: Wachstumsbeeinflussungen einer einmaligen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, 2. Bonitur in der Klimakammer	96
Tab. 28: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, 3. Bonitur in der Klimakammer	98
Tab. 29: Wachstumsbeeinflussungen einer zweimaligen Behandlung mit <i>B. subtilis</i> 2×10^9 cfu/ml und 2×10^8 cfu/ml, Abschlussbonitur in der Klimakammer	99
Tab. 30: Relativwerte für Sprossfrischmassen bei Sommergerste in der Klimakammer	104

Anhang

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Anhang 1	Erfassung der physikalischen Substratbeschaffenheiten (Tab. 1 bis 3)	141
Anhang 2	Entwicklungszustand der Bedeckungsgrade im Zusammenhang mit Behandlungsvarianten, differenziert nach Substratart (Fotos 1 bis 25)	144

Anhang 1

Tab. 1: Gegenüberstellung von Substrattemperatur im Vergleich zur Luft- und Bodentemperatur zur verschiedenen Zeitpunkten am Tag

LT. Lufttemperatur °C in 20 cm

BT. Bodentemperatur °C in 2 cm

Tag	Uhr	Temperatur (°C)				
		LT.	BT.	Ziegelbruchsubstrat	Geotextilmatten	Mineralwollmatten
20.08.03	8	19,8	20,5	18	19,5	18,5
	12	23,2	28,9	23	23	21,5
	15	23,2	30,5	24,5	25,5	25,2
21.08.03	8	21,5	20,3	17	19	18
	12	25,6	30	24	24,8	24,2
	15	26,2	32,1	25	23,5	23
22.08.03	8	21,5	21,6	18,2	19,8	18,8
	12	25,3	31,2	24,8	24,2	24
	15	26,4	31,8	24,8	23,5	23,2
25.08.03	8	20,2	19	16,6	19	17
	12	25,5	29,6	24,6	24,4	24,5
	15	25,2	30,7	26,8	27,2	26
26.08.03	8	19,2	18,5	16,4	17,4	16,6
	12	25,7	30	23,8	22,8	22,6
	15	23,7	28,5	23	21,6	20,6
27.08.03	8	14,2	19	17,3	17	16,4
	12	20,5	23,4	21	25,6	24
	15	20,3	25,2	21,2	25,8	26
28.08.03	8	16,8	18,1	16,2	16,2	15,8
	12	22,1	27,2	21	21	20,5
	15	21,2	26,8	22,2	22	21,5

Tab.2: Substrattemperatur im Vergleich mit der Luft- und Bodentemperatur um 10 und 14 Uhr

Tag	Uhr	Temperatur (°C)				
		LT.	BT.	Ziegelbruchsubstrat	Geotextilmatten	Ziegelkompostsub.
22.10.03	10	3,9	6,6	5,6	5,2	5,2
	14	7,2	9,5	8,4	7,6	7,6
23.10.03	10	0,1	2,6	2,6	1,6	2
	14	4,7	7,6	6	4,8	5
24.10.03	10	-0,2	1,9	1	0	0,8
	14	4,8	7,1	4,6	1,6	1,6
27.10.03	10	4,0	3,9	1,9	0,9	1,5
	14	6,4	9,4	5,8	3,8	3,8
28.10.03	10	2,2	2,1	1,4	0,6	0,8
	14	8,3	9,1	6	3,6	2,4
29.10.03	10	4,2	3,7	2	1,6	1,2
	14	6,9	6,6	5,2	4,6	3,2
30.10.03	10	4,1	5,9	4,8	4,4	4,2
	14	6,0	7,8	6,2	5,9	5,6
31.10.03	10	6,6	7,4	5,3	4,8	4,2
	14	9,7	9,9	8	7,6	7
03.11.03	10	10,8	9,7	8	7,6	7,2
	14	13,2	11,7	9,6	9,2	8,8
04.11.03	10	10,2	9,6	8,2	8	7,4
	14	11,4	10,3	9	8,6	8,2
05.11.03	10	8,4	8,2	4,8	3,5	3,8
	14	12,6	12,7	8,8	7,8	7,4
06.11.03	10	3,6	6,9	5,2	5	4,8
	14	4,4	7,4	5,8	5,5	5,3
07.11.03	10	3,1	5,2	4,2	4	3,6
	14	6,1	7,9	6,2	6	5,4
10.11.03	10	2,0	4,8	3,8	3,5	3,6
	14	4,0	5,7	4,6	4,4	4,4

Tab. 3: Vergleich von Gewichtsverlusten in Substraten zwischen frühmorgens und nachmittags

Tag	Uhr	Gewicht (g)											
		Ziegelbruchsubstrat				Geotextilmatten				Mineralwollmatten			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20.08.03	7	240,60	236,82	227,91	230,51	46,33	42,42	45,58	44,63	32,23	32,07	36,55	37,23
	15	235,61	231,87	222,76	225,39	44,38	40,47	43,42	42,57	30,46	30,07	34,58	35,15
21.08.03	7	235,51	231,68	222,50	225,03	46,29	42,29	45,51	44,62	31,74	31,61	36,28	36,82
	15	231,17	227,39	218,24	221,03	44,42	40,49	43,44	42,59	30,45	30,06	34,58	35,15
22.08.03	7	230,39	226,62	217,35	220,49	44,97	41,02	44,09	43,28	31,04	30,63	35,20	35,92
	15	227,26	223,31	214,06	217,34	44,46	40,58	43,52	42,72	30,54	30,15	34,67	35,22
25.08.03	7	236,03	233,27	224,45	227,57	47,00	44,29	46,26	45,59	33,43	32,63	37,80	38,83
	15	231,27	228,31	219,35	222,33	44,50	40,88	43,55	42,78	30,57	30,18	34,72	35,37
26.08.03	7	231,31	228,24	219,24	222,44	46,20	42,34	45,40	44,54	31,96	31,54	36,15	36,88
	15	227,62	224,49	215,41	218,67	44,58	40,70	43,63	42,86	30,62	30,23	34,75	35,27
27.08.03	7	226,73	223,59	214,35	217,76	44,78	40,87	43,81	43,08	30,92	30,48	35,09	35,60
	15	225,30	221,96	212,84	216,38	44,66	40,78	43,68	42,94	30,68	30,34	34,86	35,33
28.08.03	7	224,79	221,49	212,23	216,03	44,95	41,17	44,03	43,32	30,95	30,61	35,22	35,80
	15	223,29	219,63	210,45	214,21	44,70	40,84	43,74	43,01	30,71	30,38	34,87	35,32

Anhang 2 (Fotos: Fachgebiet Zierpflanzenbau)



Foto 1: unbehandelte Kontrolle (K1c1) auf
Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 2: Kontrolle mit Nährsubstrat (K2c1)
auf Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 3: Sofortbehandlung mit *B. subtilis* (a1b1c1)
auf Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 4: Sofortbehandlung mit *Lactobacillus*
(a1b2c1)
auf Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 5: nach 2 Wochen Behandlung mit
B. subtilis (a2b1c1) auf
Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 6: nach 2 Wochen Behandlung mit
Lactobacillus (a2b2c1) auf
Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 7: Kombination mit *B. subtilis* und
Nährsubstrat (a3b1c1) auf
Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 8: Kombination mit *Lactobac.* und
Nährsubstrat (a3b2c1) auf
Ziegelbruchsubstrat im Juli 03



Foto 9: unbehandelte Kontrolle (K3c4) auf
Ziegelkompostsubstrat im Juni 04



Foto 10: Kontrolle mit Nährsubstrat (K2c4)
auf Ziegelkompostsubstrat im Juni 04



Foto 11: nach 2 Wochen Behandlung mit
B. subtilis (a2b1c4) auf
Ziegelkompostsubstrat im Juni 04



Foto 12: nach 2 Wochen Behandlung mit
Lactobacillus (a2b2c4) auf
Ziegelkompostsubstrat im Juni 04



Foto 13: Kombination mit *B. subtilis* und
Nährsubstrat (a3b1c4) auf
Ziegelkompostsubstrat im Juni 04



Foto 14: Kombination mit *Lactobac.* und
Nährsubstrat (a3b2c4) auf
Ziegelkompostsubstrat im Juni 04



Foto 15: unbehandelte Kontrolle (K1c2) auf
Geotextilmatten im August 03



Foto 16: Kontrolle mit Nährsubstrat (K2c2)
auf Geotextilmatten im August 03



Foto 17: Sofortbehandlung mit *B. subtilis*
(a1b1c2)
auf Geotextilmatten im August 03



Foto 18: Sofortbehandlung mit *Lactobacillus*
(a1b2c2)
auf Geotextilmatten im August 03



Foto 19: nach 2 Wochen Behandlung mit *B. subtilis* (a2b1c2) auf Geotextilmatten im August 03



Foto 20: nach 2 Wochen Behandlung mit *Lactobacillus* (a2b2c2) auf Geotextilmatten im August 03



Foto 21: Kombination mit *B. subtilis* und Nährsubstrat (a3b1c2) auf Geotextilmatten im August 03



Foto 22: Kombination mit *Lactobac.* und Nährsubstrat (a3b2c2) auf Geotextilmatten im August 03



Foto 23: Sofortbehandlung mit *B. subtilis* (a1b1c3) auf Mineralwollmatten im August 03



Foto 24: Sofortbehandlung mit *Lactobacillus* (a1b2c3) auf Mineralwollmatten im August 03



Foto 25: unbehandelte Kontrolle (K1c3) auf Mineralwollmatten im August 2003

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die das Zustandekommen dieser Arbeit gefördert haben:

Meinem Doktorvater, Herrn PD Dr. H. Grüneberg, bin ich zu großem Dank verpflichtet für die Möglichkeit, die hier vorliegende Arbeit am Fachgebiet Zierpflanzenbau durchführen zu können sowie für seine ständige Bereitschaft zur Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Dr. Ch. Ulrichs vom Urbanen Gartenbau am Institut für Gartenbauwissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin gilt mein ganz besonderer Dank sowohl für sein großartiges Interesse an dem Thema als auch für die bereitwillige Hilfe, die Begutachtung dieser Arbeit zu übernehmen.

Herrn Dr. H.-J. Henze vom Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) an der Humboldt-Universität zu Berlin bin ich sehr dankbar für sein großes Engagement, diese Arbeit zu begutachten ebenso für die Bereitstellung der benötigten Versuchsmaterialien und hilfreiche Diskussionen.

Meinen herzlichen Dank schulde ich Herrn Prof. Dr. sc. H.-G. Kaufmann für die methodischen Anregungen sowie zahlreiche Diskussionen, die für den Fortgang der Arbeit wichtige Impulse lieferten.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. K.-D. Hentschel vom Fachgebiet Phytomedizin an der Humboldt-Universität zu Berlin für seine Unterstützung bei fachlichen Fragen und vielen wertvollen Hinweisen und Gesprächen.

Frau Dr. C. Oschmann sei ebenfalls nicht nur für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, sondern insgesamt für die große Bereitschaft zur Hilfe in jeder Frage herzlich gedankt.

Weiterhin möchte ich recht herzlich danken:

Frau Dr. B. Kroschewski vom Fachgebiet Biometrie und Versuchswesen an der Humboldt-Universität zu Berlin für die freundliche Hilfe bei der Auswertung statistischer Daten.

Herrn Dipl. agr. Ing. K. P. Götz vom Fachgebiet Pflanzenbau in den Tropen und Subtropen an der Humboldt-Universität zu Berlin für die Anleitung und Unterstützung bei der Bildanalyse.

Herrn Dipl. Biologe M. Siemsen von (IASP) danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit.

Den Assistentinnen: Frau Sentner, Frau Donat sowie Frau Stein gilt mein schöner Dank für ihre tatkräftige und moralische Unterstützung, die sie mir in der Zeit der Doktorarbeit zukommen ließen.

Den übrigen Mitarbeitern des Institutes für Gartenbauwissenschaften danke ich für ihre Freundschaft, die kollegiale Zusammenarbeit und die wertvolle Unterstützung.

Der Tischrin Universität in Syrien danke ich für die finanziellen Mittel, die mir den Aufenthalt in Deutschland und diese Promotion ermöglichten.

Eidesstattliche Erklärung

Hierdurch erkläre ich an Eides statt, dass ich meine Doktorarbeit selbständig, ohne unerlaubte Hilfsmittel außer den von mir bezeichneten Quellen, angefertigt und dass ich bisher keinen anderen Promotionsversuch unternommen habe.

Berlin, Februar 2005

Sadif Dunya